А. А. ЮТКИН

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

МАШГИЗ
1955

Л. А. ЮТКИН

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

В брошюре дается краткое описание явлений, сопровождающих высоковольтный разряд в жидкости. Это явление (названное автором „электрогидравлический эффект") заключается в том, что при создании внутри объема жидкости специально сформированного импульсного электрического разряда в зоне последнего развиваются весьма высокие давления, которые можно широко использовать в практических целях.

В связи с новизной вопроса и перспективой многообразного применения достигнутых результатов брошюра представляет интерес для широкого круга работников различных специальностей как соприкасающихся с вопросами физики электрических разрядов, так и работающих в области использования высоких давлений и импульсных упругих ударов.

Научный редактор инж. *Л. Я. ПОПИЛОВ*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по конструированию
и эксплуатации машин
Заведующий редакцией инж. *Ф. И. ФЕТИСОВ*

ПРЕДИСЛОВИЕ

При создании внутри объема жидкости специально сформированного импульсного высоковольтного электрического разряда в зоне последнего развиваются весьма высокие давления. Проявляются они весьма многообразно, например, в интенсивном механическом разрушении помещенных вблизи объектов, выбросе жидкости и т. д.

Опытным путем удалось установить наличие некоторых закономерностей в характере и результатах этого явления, названного нами «электрогидравлическим эффектом». В общих чертах определены возможности его применения для практических целей.

Брошюра содержит краткое описание электрогидравлического эффекта, методики его исследования и итогов проведенных опытов, а также соображения о перспективах использования описываемого явления.

Темпы развития и практическое освоение электрогидравлического эффекта, которое в настоящее время находится, по существу, в начальной стадии, во многом будут зависеть от активного включения научной и инженерно-технической общественности в реализацию этого нового метода. Новизна и необычность изложенных в брошюре положений, фактов и выводов могут вызвать у отдельных читателей ряд возражений и сомнений. Автор и не склонен защищать отдельные формулировки, допуская возможность неточностей их, и будет благодарен читателям за деловую, принципиальную критику.

В заключение автор считает своим долгом выразить глубокую признательность организациям и лицам, оказавшим ему содействие и помощь в проведении и опубликовании данной работы.

Автор

ГЛАВА I

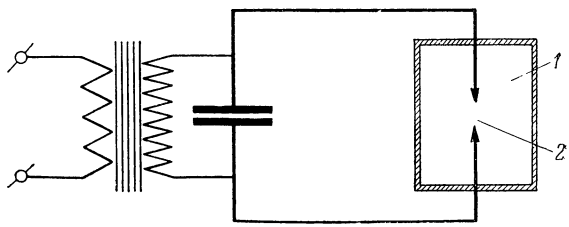
ЯВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ЗОНЫ РАЗРЯДА

1. Основные схемы

Начиная с 1938 г. автор исследовал явления, возникающие в зоне высоковольтного искрового разряда в жидкой среде.

В начальной стадии эти исследования подтвердили существующие данные о том, что такой разряд в жидкостях с ионной проводимостью либо не возникает вовсе, либо происходит лишь в случаях очень малой длины искрового промежутка, причем всегда сопровождается обильным газо- и парообразованием.

В диэлектрических жидкостях разряд возникает легко и также протекает со значительным образованием газов и пара.



Фиг. 1. Схема установки для исследования пробоя жидкостей:
1 — ванна с жидкостью; *2* — искровой промежуток.
(Включение кенотрона не показано. Разрядный контур выделен жирной линией).

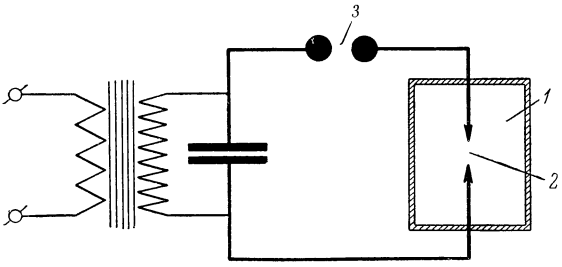
Механическое воздействие жидкости на объекты, помещенные вблизи канала разряда, получаемого по схеме (фиг. 1), практически ничтожно для жидкостей с ионной проводимостью и сравнительно ощутимо лишь в среде жидких диэлектриков.

Как в проводящих, так и в диэлектрических жидкостях механическое действие определяется давлениями внутри паро-газового пузыря, возникающего вокруг зоны разряда. Значения этих давлений по литературным данным невелики.

Создающиеся в жидкости гидравлические импульсы в рассматриваемых случаях имеют пологий фронт и значительную длительность протекания, обладая небольшой мощностью.

Автор поставил перед собой задачу — найти условия, в которых действие гидравлических импульсов могло быть резко усилено. Повидимому, канал разряда с существующими в нем высокими давлениями не может непосредственно сопри-

касаться с жидкостью и создавать в ней то же давление, а производит это через некоторый слой газа и пара. Следовательно, чтобы повысить давление и усилить механическое воздействие жидкости на объекты, необходимо было найти способы уменьшения толщины газопаровой оболочки и сокращения продолжительности разряда, в течение которого она создается и существует. Одновременно надо было повысить мощность единичного импульса.



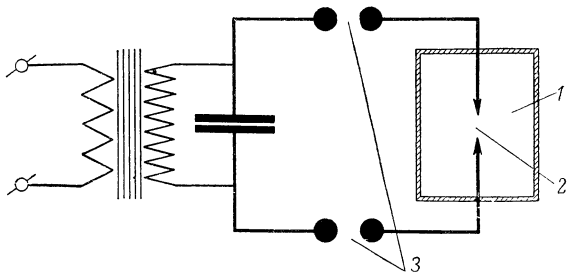
Фиг. 2. Схема установки с добавочным искровым промежутком:

1 — ванна с жидкостью; *2* — основной искровой промежуток; *3* — добавочный искровой промежуток. (Включение кенотрона не показано).

Для достижения этого были выбраны две наиболее простые электрические схемы.

Первая схема (фиг. 2), характеризующаяся наличием добавочного искрового промежутка, позволила получать искровой разряд в жидкостях с ионной проводимостью, резко усилить механический эффект и почти полностью устранить газо- и парообразование.

В другой схеме (фиг. 3), принятой впоследствии в качестве основной, применено два добавочных разрядных промежутка, называемых нами в дальнейшем «формирующими», включенных последовательно по обе стороны от основного. Установлено, что при соответствующем подборе длины формирующих и основного промежутков эта схема позволяет еще более усилить механическое воздействие разряда и полностью устранить (во всяком случае, визуально) газо- и парообразование.



Фиг. 3. Схема основной установки для воспроизведения электрогидравлического эффекта с двумя добавочными искровыми промежутками:

1 — ванна с жидкостью; *2* — основной искровой промежуток; *3* — добавочные искровые промежутки. (Включение кенотрона не показано).

Дальнейшее увеличение числа промежутков, как показали опыты, снижает интенсивность электрогидравлического эффекта.

Описанные схемы, являясь релаксационными, сохраняют и поддерживают любую частоту разрядов, заданную изменением

длины формирующих промежутков при постоянной длине основного.

Форма волны импульса в разряде, получаемом по приведенным схемам, носит различный характер, подчиняясь известным в электротехнике зависимостям.

Гидравлические импульсы, возникающие в результате разряда в жидкости, состоят из двух ударов: основного — гидравлического и второго — кавитационного.

Форма основных гидравлических импульсов (или «электрогидравлических ударов») примерно аналогична форме импульсов тока.

Чем короче импульс тока, круче его фронт и выше амплитуда, тем короче и сильнее гидравлический удар, бризантнее действие последнего. И, наоборот, чем длиннее импульс тока и ниже его амплитуда, тем продолжительнее гидравлический удар и слабее его разрушающее действие.

Введение в электрическую схему двух дополнительных, формирующих искровых промежутков придает ей особые свойства, требующиеся для создания электрогидравлического эффекта.

Дополнительные, формирующие промежутки позволяют:

1) накапливать дозированные количества энергии, с импульсной подачей ее затем на основной промежуток;

2) значительно сокращать длительность импульса, предотвращать возникновение колебательных процессов и получать практически один мощный, весьма кратковременный импульс при каждом цикле:

3) создавать крутой фронт импульса, исключая возможность перехода к дуговому разряду;

4) получать при данном основном промежутке любое из допустимых для данной силовой установки значение тока и напряжения;

5) симметричным либо асимметричным регулированием их длины изменять форму импульса и характер разряда в основном промежутке;

6) устанавливать последовательность пробоя промежутков, при которой сначала пробиваются дополнительные, формирующие, а затем и основной, выделяя на нем наибольшую долю энергии.

Перечисленные и другие преимущества принятой схемы, а также простота осуществления определили ее выбор. Однако это не дает основания считать ее единственно пригодной для создания электрогидравлического эффекта.

Устойчивый режим работы установок, при регулировании его с помощью дополнительных, формирующих промежутков, имеет широкий диапазон. Когда они замкнуты, то жидкость между остриями основного промежутка свободно пропускает ток.

Если же формирующие промежутки постепенно раздвигать, то на основном вначале пробой не возникает, хотя оба дополнительных уже начали пробиваться. Это происходит потому, что

напряжение на основном промежутке так быстро падает, что напряжения и формы импульсов, нужных для его пробоя, еще нет.

Нижний предел устойчивого режима работы определяется такой длиной формирующих промежутков, которая обеспечивает не только формирование импульсов, но и напряжение, достаточное для пробоя основного промежутка. Верхний предел режима, при дальнейшем раздвигании дополнительных промежутков, наступит, когда напряжение, развиваемое установкой, окажется уже недостаточным для пробоя всех трех промежутков — двух формирующих и основного.

Таким образом, представляется возможным широко регулировать напряжение, мощность и форму волны импульсов, подаваемых на основной промежуток.

2. Особенности электрогидравлического эффекта

Следует отметить, что электрогидравлический метод существенно отличается от электроискровой обработки металлов. Отличие заключается не только в полном несоответствии электрических схем, физических процессов и энергетических параметров, но также и в том, что при электрогидравлическом эффекте механическое воздействие на объект осуществляется не непосредственно разрядом, а косвенно — средой, в которой он возникает.

При электроискровой обработке металлов используется, так сказать, линейное (по направлению разряда) тепловое действие импульсных разрядов при значительно меньших напряжениях и длительности.

Электрогидравлический метод основан, наоборот, на радиальном (перпендикулярном к направлению разряда) механическом действии расширяющегося канала высоковольтного и весьма кратковременного импульсного разряда на окружающую жидкую среду, передающую это действие на обрабатываемый объект.

Таким образом, при электрогидравлическом эффекте тепловое воздействие на объект отсутствует, а механическое осуществляется через жидкую среду, без непосредственного электрического контакта.

В развитие широко распространенных взглядов о тепловой природе процесса электроискровой обработки автор на основании своих опытов полагает, что при этом виде обработки металл, расплавленный импульсом тока, выбрасывается не электродинамическими силами, а, вероятнее всего, силами теплового взрыва и последующим кавитационным ударом.

Средой для получения электрогидравлического эффекта может служить любая жидкость. Наиболее удобной является техническая вода. Чем жидкость менее сжимаема, тем выше получаемое давление и бризантнее электрогидравлический удар.

Жидкая среда, окружающая канал разряда, воспринимает образующиеся в нем высокие давления и в той или иной степени передает их ближайшим объектам.

Чем меньше прослоек отделяет жидкую среду от канала разряда и чем меньше суммарная толщина этих прослоек, тем быстрее будут переданы давления и выше их амплитуда.

Чем более плотна и менее сжимаема окружающая канал разряда жидкость, тем ближе по величине возникающие в ней давления к давлениям в канале искры.

Так как жидкую среду практически можно считать несжимаемой (для воды, например, коэффициент сжатия составляет 0,000048), то этим объясняется происхождение огромных механических усилий в электрогидравлических устройствах.

Обычные технические приемы позволяют изменять по желанию время протекания импульсного разряда и его характер. Соответственно, и давление, развиваемое в жидкости, по своему характеру может быть любым, что позволяет использовать электрогидравлический эффект для разнообразных целей.

3. Проявления электрогидравлического эффекта

Электрогидравлический эффект легко наблюдается в открытом сосуде, заполненном любой жидкостью.

При этом можно видеть, какое значение имеет предварительное формирование импульса.

Так, например, мощный, но не специально сформированный импульс пробивает слой жидкости в 100—150 *мм*, не создавая существенных внешних механических эффектов (наблюдается только легкое колебание поверхности жидкости).

В то же время менее мощный, но специально сформированный импульс выбрасывает до 10—15 *л* жидкости на высоту нескольких метров при той же длине искры, либо разрушает скрепленный болтами прочный сосуд объемом около 400 *л* из оргстекла толщиной 16 *мм*.

Акустическое действие электрогидравлического удара также превосходит действие разрядов той же мощности, но не имеющих специальной формы.

Таким образом, электрогидравлический эффект представляет собой принципиально новый вид преобразования электрической энергии в механическую без промежуточных звеньев, с высоким коэффициентом преобразования, практически пригодный для использования в промышленных целях.

Известно [1], что пробивное напряжение в жидкостях не зависит от давления, асимптотически приближаясь к почти одинаковому для всех жидкостей пределу уже при нескольких тысячах атмосфер.

Это позволяет предположить, что при работе на таких давлениях к. п. д. электрогидравлических устройств может стать

[1] Бриджмен, Физика высоких давлений, пер. с англ., ГТТИ, 1949.

очень высоким. Этим же можно объяснить и высокую отдачу энергии в электрогидравлическом ударе при атмосферном давлении.

Жидкость, окружающая зону разряда, оказывает огромное сопротивление ее расширению.

Вследствие того, что разрядный канал в начальной стадии процесса имеет ничтожно малое сечение, плотность энергии в нем и увеличение его сечения нарастают чрезвычайно быстро, в силу чего явление приобретает характер взрыва.

Сопротивление расширению канала разряда является таким образом своеобразным сопротивлением току, но, в отличие от обычных омических сопротивлений, направлено не линейно против направления тока, а радиально-перпендикулярно к его направлению.

Сопротивление это весьма велико — за микросекунды на нем выделяются тысячи джоулей. Поэтому работа емкости контура на основной промежуток уже не будет работой на короткое замыкание в момент его пробоя.

Развивающийся, но не установившийся искровой разряд в начальной стадии расширения канала происходит внутри чрезвычайно уплотненной «трубки» жидкости, оказывающей большое сопротивление его дальнейшему расширению. Это явление происходит при давлениях, значительно превышающих указанные выше критические, в силу чего как коэффициент перехода, так и выход полезной энергии оказываются чрезвычайно высокими.

Вода и другие ионопроводящие жидкости при получении в них разрядов по нашей основной схеме ведут себя как изоляторы, а обычные изоляторы, помещаемые в эти жидкости, не только не теряют изолирующих свойств, но и как бы улучшают их.

Высокая электрическая прочность ионопроводящих жидкостей при электрогидравлическом эффекте связана с исключительной быстротой протекания пробоя, при которой малая подвижность ионов в жидкостях проявляется в том, что они, очевидно, не успевают сдвинуться с места в течение процесса.

При опытах было замечено, что повышение концентрации некоторых ионов в жидкостях, до этого не проводивших тока, скачкообразно придает им очень высокую проводимость, сравнимую с металлической.

Замечено, что с увеличением крутизны фронта и с уменьшением длины волны способность импульса пробивать концентрированный раствор какого-либо электролита заметно повышается. Очевидно, при любой концентрации электролита раствор может быть пробит при очень крутом фронте и весьма короткой волне импульса.

В ходе исследований установлено, что при пробое жидкости по основной схеме вокруг канала разряда возникает з о н а в ы с о к о г о д а в л е н и я, имеющая характерную форму (фиг. 4). Для наглядности мы схематически делим эту зону на ряд участков.

А — зона искрового разряда.

Б — зона разрушения; почти все материалы разрушаются на дисперсные частицы, а жидкость в ней, повидимому, приобретает свойства твердого хрупкого тела [1].

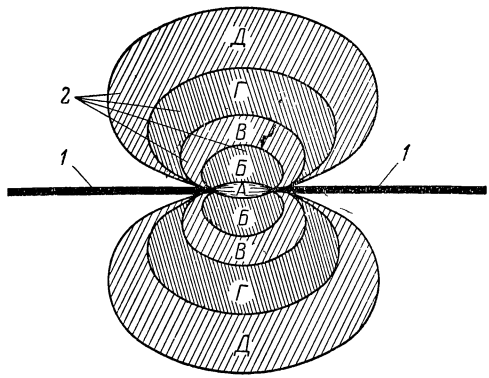
В — зона наклепа; многие материалы разрушаются, металлы наклепываются, жидкость, повидимому, находится в состоянии твердого упругого тела.

Г — зона упругого воздействия; происходит выброс частиц, возникает мощное выталкивающее действие, жидкость, повидимому, находится в состоянии жидкого очень упругого тела.

Д — зона сжатия; давление очень быстро убывает с увеличением расстояния от источника возникновения. Наблюдаются перемещения больших объемов жидкости.

Помещение металлов в зону разрушения (*Б*) на расстояния, меньшие половины длины искры, невозможно, так как возникает пробой на металл (замыкание по металлу).

Использование металлического объекта в роли одного из электродов также не позволяет поместить его в зону разрушения.



Фиг. 4. Схема формы и расположение зон давления вокруг искрового разряда в начальный период:

1 — электроды; *2* — зоны давления.

Как видно из фиг. 4, проводящий объект в роли электрода подвергается влиянию лишь краевых давлений зоны наклепа (*В*). При этом на нем около точки падения разряда возникает чашеобразная вмятина небольшой глубины.

Из фиг. 4 следует, что концы электродов при их линейном расположении практически не подвергаются механическим воздействиям. Лишь при очень толстых электродах острия их сглаживаются действием струй жидкости.

Диаметр зоны разрушения пропорционален мощности импульса. Так, например, для электрофорной машины и индук-

---

[1] По М. Корнфельду (см. его книгу «Упругость и прочность жидкостей», ГТТИ, 1951 г.) модуль сдвига жидкости заведомо меньше ранее предложенных 10^{10} *дин/см*^{2}, а время релаксации жидкости много больше, чем также ранее предполагавшиеся $10^{-10} \div 10^{-12}$ сек.

Отсюда предположения о возможном приобретении жидкостью в зонах, ближайших к зоне разряда, свойств твердого тела представляются вероятными.

Корнфельд утверждает, что «жидкости будут вести себя как твердые тела при периодах воздействия, много больших указанных выше времени релаксации...». (см. 71).

ционной катушки при емкости $C = 0{,}05$ *мкф* и длине искры в жидкости 8 *мм* диаметр зоны разрушения равен 2—3 *мм*.

Диаметр зоны разрушения при питании от рентгеновского трансформатора 100 *кв* постоянным током через кенотрон КР-110 приведен в табл. 1.

Таблица 1

Диаметр зон разрушения на стандартных абразивных кругах

№ опыта	Напряжение *кв*	Емкость *мкф*	Длина разряда *мм*	Диаметр зоны разрушения *мм*
1	30	0,2	10	5
2	30	0,7	10	7
3	30	0,7	30	15
4	50	0,7	50	26
5	50	0,7	70	38
6	50	0,7	90	45
7	50	0,7	110	57
8	70	0,7	130	69
9	70	0,7	150	75
10	70	0,7	170	82
11	70	0,7	190	95
12	70	0,7	210	105

Зоны *В*, *Г*, *Д*, окружающие зону разрушения, имеют соответственно большие размеры.

Мгновенная мощность отдельных импульсов весьма велика. Так, например, для установки мощностью в 1 *квт* при 50—70 *кв* мощность в единичном импульсе достигает более 100 000 *квт*.

Эрозия электродов мало ощутима и становится заметной лишь при больших емкостях и малой длине основного промежутка, причем, во всех случаях можно подобрать такие параметры схемы, при которых эрозия электродов основного промежутка будет практически отсутствовать. Это весьма важно для реализации эффекта.

Опыты выявили, что развитие и протекание разряда при железных электродах происходит легче, чем при медных, что свидетельствует о влиянии материала электродов на процесс пробоя.

Исследования показали также, что разряд в воде для случая «острие — острие» почти не ветвится на своем пути, но для случая «острие — диск» ветвистость у концов разряда появляется часто и заметна по легкой эрозии в местах входа ветвей разряда в поверхность диска. В некоторых разрядах наблюдалось до

5—8 разветвлений разных сечений, что было легко установить по различию площадей точек эрозии.

Как ветвящиеся, так и не ветвящиеся разряды дают одинаковые результаты.

Электрогидравлический эффект не сопровождается газо- и парообразованием. Для случая работы в воде следует предположить, что ничтожные количества газов и пара, которые могли бы в ней образоваться за ничтожно короткий срок разряда, будут либо «сожжены» тем же разрядом в конце его существования, либо немедленно по прекращении разряда конденсируются и растворяются в жидкости.

Процесс пробоя основного промежутка, повидимому, различен для случаев проводящей и непроводящей среды.

Вода в основном промежутке до наступления пробоя ведет себя как проводник и обеспечивает поэтому равновеликий потенциал на всей правой части схемы (фиг. 3), за формирующими промежутками.

В момент пробоя одного из формирующих промежутков вода мгновенно перестает быть проводником и практически становится изолятором. При этом внутри воды, в основном промежутке от одного электрода к другому, начинает расти стример определенной полярности (отсюда — тип пробоя).

Когда стример достигнет некоторого предела, наступает пробой второго промежутка и замыкание стримером обоих электродов, т. е. начало пробоя основного промежутка. Вся энергия, накопленная в контуре в этот момент, скапливается на правой части схемы, т. е. практически на ее основном промежутке.

Далее происходит расширение канала искры до предела, обусловленного мощностью тока, затем — возникновение полости, сопровождающееся основным ударом, и заполнение ее жидкостью, завершающееся кавитационным ударом.

Если жидкость — диэлектрик, она всегда является изолятором, худшим до пробоя формирующих промежутков и лучшим — после их пробоя. До пробоя одного из формирующих промежутков на правой части контура потенциал не будет одинаков и шары разрядников будут иметь разный потенциал.

Пробой второго промежутка также, повидимому, наступает до того, как стример дойдет до второго электрода.

Опыт показывает, что на основном промежутке в жидкостях — диэлектриках выделяется меньше энергии, чем в воде, чего, повидимому, нельзя объяснить только большей плотностью воды.

Расширение канала разряда совершается с огромными скоростями, замедляясь к концу процесса. В начале этого периода — непосредственного соприкосновения с жидкостью — происходит теплопередача и передача давления жидкости через тонкую парогазовую рубашку, окружающую искровую зону. Затем скорость раздвигающейся от нее жидкости обгоняет расширение канала

разряда, и жидкость раздвигается до предела, обусловленного некоторым равновесием, образуя полость.

Стенки полости, в ее предельном расширении, находятся, повидимому, под давлением, допустимым для существования кавитационного пузыря, с учетом наличия некоторого количества газов и пара внутри полости.

Затем газы и пар расширяются, охлаждаются, полость смыкается, газы и пар конденсируются и растворяются, на чем весь цикл и заканчивается.

Выделение тепла на основном промежутке ничтожно мало, электроды и объекты обработки не нагреваются.

Но в очень малых объемах жидкости, при весьма малых основных промежутках и больших емкостях, выделение тепла (при большой частоте разрядов) становится уже ощутимым.

Как уже указывалось, электрогидравлический эффект сопровождается кавитационными явлениями.

При прохождении разряда происходит нарушение сплошности в жидкости с преодолением молекулярного сцепления частиц и образование полости внутри ее объема.

Сразу же по прекращении разряда происходит смыкание стенок образовавшейся полости, которое протекает со звуковыми или сверхзвуковыми скоростями; это сопровождается теми же явлениями, что и хорошо изученная кавитация.

Величина полостей — пустот, возникших в жидкости при электрогидравлических ударах, может достигать заметных размеров.

Так, например, при искре длиной 45 *мм*, емкости $C = 0{,}7$ *мкф* и напряжении 50 *кв* полость имела веретенообразную форму длиной 80 *мм* с наибольшим диаметром 70 *мм* и объемом более 100 *см*^{3}.

При образовании таких пустот они заполняются следами продуктов газо- и парообразования, неизбежного при мощных разрядах.

Ничтожное количество газов и пара, образующихся вокруг зоны разряда, расширяясь, заполняет всю полость. При этом они резко охлаждаются и конденсируются.

Смыкание стенок полости вызывает появление кавитационного удара, дополняющего основной удар разряда.

Если разряд происходит вблизи поверхности какого-либо объекта, возникшая полость оказывается деформированной и имеет одностороннюю полусферическую форму. Одностороннее заполнение ее жидкостью вызывает кавитационный удар о поверхность объекта, приводящий к более или менее интенсивному ее разрушению.

Возникновение и последующее заполнение полости также подтверждает наличие в зоне разряда весьма высоких давлений. Опыты позволяют считать, что величина получаемых давлений пропорциональна мощности, обратно пропорциональна длитель-

ности импульса и зависит от коэффициента объемного сжатия жидкости.

По характеру повреждений различных материалов в зоне разрушения также можно заключить, что вызвавшее их давление весьма велико.

Объем жидкости, необходимой для того, чтобы в ней возник эффект, может быть ничтожен. Так, между двумя сложенными стеклами толщина слоя воды составляет сотые доли миллиметра, но этого оказывается достаточно, чтобы стекло было пробито электрогидравлическим ударом от разряда электрофорной машины, хотя в воздухе такого эффекта нет и после сотен ударов.

Здесь же можно отметить и отсутствие газов и пара: при достаточно толстых стеклах, не разрушаемых за несколько ударов, в воде между стеклами не видно пузырьков газа.

Давление, развиваемое единичным ударом, зависит, в определенных пределах, от емкости конденсатора.

Увеличение емкости, с одной стороны, повышает длительность импульса, т. е. «смягчает» его, уменьшая величину давления, но, с другой стороны, эта же причина увеличивает количество выделяющейся в канале искры энергии, а значит, увеличивает размеры упомянутых выше зон и повышает давление в них.

Применявшаяся нами схема позволяет отрегулировать ее на различную частоту чередования импульсов, выдерживаемую затем с достаточным постоянством.

При работе на переменном токе можно отрегулировать схему так, чтобы пробой происходил при максимуме амплитуды напряжения с частотой питающего тока и т. п.

Решающую роль в получении необходимого результата играет, однако, крутизна фронта получаемого импульса.

В целях увеличения крутизны фронта и укорочения длины волны импульса могут быть применены известные способы, в том числе поджигание промежутков. Исследования показали резкое увеличение жесткости импульса при введении поджигания.

В одном из опытов, поставленных в 1951 г., в качестве силовой установки был использован ударный генератор, развивавший напряжение до 500 *кв*.

Предполагалось, что этот генератор должен был дать значительно более сильный эффект, чем применявшиеся ранее источники. Однако при осуществлении опыта без дополнительных, формирующих промежутков и специальной емкости в контуре электрогидравлический эффект, несмотря на наличие в воде разряда длиной 80 *мм*, полностью отсутствовал.

После включения одного формирующего промежутка с шарами диаметром 50 *мм* возникло незначительное волнение на поверхности жидкости. Разряд имел длину около 80 *мм*, формирующий промежуток — 30 *мм*, напряжение составляло 200 *кв*, глубина погружения — 200 *мм*.

После установки второго промежутка с шарами диаметром 30 *мм* при тех же параметрах устройства и дополнительными промежутками 20 и 30 *мм* был зафиксирован выброс после каждого удара до 250 $см^3$ жидкости на высоту в среднем до полуметра.

Эти опыты показали большое значение крутизны фронта импульсов для возникновения электрогидравлического эффекта и необходимость специальной схемы разрядного контура.

Достаточно крутой фронт импульсов ударного генератора при разрядах в воздухе уменьшал свою крутизну при разрядах в воде.

Включение формирующих искровых промежутков увеличило крутизну, но эффект не достиг максимального значения, несмотря на большую мощность установки. Однако не было еще законченного разрядного контура, и для получения максимального эффекта потребовалось еще включение отдельной емкости. Разряды первого типа, мощные, но не вызывающие электрогидравлического эффекта, названы нами «мягкими». Такой разряд имеет пологий фронт, большую длину волны и незначительную мощность импульса.

В очень редких случаях, примерно один раз на тысячу, нами наблюдалось появление мягких разрядов даже при пользовании нормальной схемой с дополнительными промежутками и емкостью. Такие разряды сопровождались очень слабым звуковым и практически ничтожным электрогидравлическим эффектом.

В дальнейшем было установлено, что мягкие разряды при пользовании нормальной схемой возникали только при настройке в случаях минимальных напряжений пробоя и сильно разнящейся между собой длине формирующих промежутков.

После настройки контура на устойчивый режим работы основного промежутка появления в нем мягких разрядов больше не наблюдалось.

При дальнейшем увеличении крутизны фронта и уменьшении длины волны, повидимому, представляется возможным осуществить электрический пробой металлов.

Проведенный опыт пробоя ртути, по нашей схеме, с питанием от электрофорной машины, подтверждает это.

ГЛАВА II

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

4. Оборудование и приборы для опытов

При проведении описываемых в брошюре опытов использовались источники питания четырех типов:

1) школьная электрофорная машина; $U = 50$ *кв*, $W = 3$ *вт*;

2) школьная индукционная катушка; $U = 50$ *кв*, $W = 30$ *вт*;

3) лабораторная индукционная катушка; $U = 30$ *кв*, $W = 500$ *вт*;

4) рентгеновский трансформатор; $U = 100$ *кв*, $W = 3$ *квт*.

Большая часть работ была выполнена с последним источником питания, включенным в однополупериодный выпрямитель на кенотроне КР-110. При этом использовалась только половина мощности трансформатора, т. е. 1,5 *квт* вместо 3 *квт*.

Емкости, применявшиеся в опытах с данной установкой, позволяли иметь в контуре соответственно: 0,03; 0,2; 0,5; 0,7 и 1,0 *мкф*.

Максимальная длина разряда в воде заметно зависит от величины емкости в контуре. Так, например, при емкости в 0,03 *мкф* даже при 50—80 *кв* не удавалось получить искру длиннее 5 *мм*, но при емкости в 0,7 *мкф* и том же напряжении легко возникали разряды длиной 100, 150 и даже 200 *мм*. С емкостью в 1 *мкф* при 80—100 *кв* удавалось получать разряды в воде длиною до 220—250 *мм*.

Нами исследовалось также затухание импульсов и уменьшение крутизны их фронта при передаче импульсов по достаточно длинным кабелям, что аналогично появлению в разрядной цепи дополнительной распределенной емкости. В связи с трудностью осуществления такой распределенной емкости в широком диапазоне, она заменялась сосредоточенной емкостью, подключенной параллельно основному искровому промежутку, после формирующих промежутков.

При этом было установлено, что подключение сосредоточенной емкости до 0,05 *мкф* не снижает эффективности электрогидравлических ударов.

Включение емкостей, больших 0,05 *мкф*, не производилось.

Формирующие искровые промежутки из никелированных шаров диаметром 50 *мм* допускали возможность широкой регулировки их длины во время работы установки.

Опытами установлено, что эрозионный износ поверхности шаров формирующих промежутков ничтожен. Десятки тысяч разрядов, возникавших на них за время работы, вызывали лишь повреждение тонкого слоя никелировки и незначительную общую эрозию глубиной не более 0,05 *мм*. Площадь эрозионного повреждения ограничивается пятном размером 5—6 $см^2$.

Разряды осуществлялись в открытой ванне, выполненной из листового оргстекла толщиной 16 *мм*, скрепленного клеем и болтами.

Ванна заполнялась водопроводной водой.

Прозрачные стенки позволяли наблюдать и фотографировать происходившие в ванне явления.

Для исследования разрядов на дно ванны помещалось специальное приспособление, позволявшее регулировать длину основного промежутка, менять материал электродов, устанавливать их в любом положении вблизи исследуемых образцов и т. п.

К условиям постановки опытов с источником питания в 1,5 *квт* следует добавить, что ванна из оргстекла, несмотря на ее удобство, имела существенный недостаток, так как разрушалась уже при сравнительно маломощных разрядах.

Как правило, разряд длиной 80—100 *мм* вызывал появление разрушений и течь ванны, не говоря уже о более мощных разрядах, также получавшихся на этой установке.

Осуществление же разрядов вблизи поверхности жидкости помещением искрового промежутка разрядного устройства не глубже 100—150 *мм* сохраняло дно ванны от выбивания ударом, но создавало выброс большого количества воды. Попытки закрывать ванну крышкой не улучшили положения, так как крышку вместе с положенным на нее грузом приподнимало и подбрасывало.

При любых условиях защиты ванны разряды длиной более 150 *мм* можно было производить только при условии выхода ванны из строя.

В частности, поэтому у нас отсутствуют снимки разрядов длиннее 135 *мм*, хотя они, как указывалось, производились неоднократно.

5. Характер исследованных разрядов и их действие

С помощью упомянутого приспособления был осуществлен ряд разрядов, условия выполнения которых приведены в табл. 2, а часть фотографий показана на фиг. 5 и 6.

В ряде случаев, при недостаточной глубине погружения разрядного промежутка, отмечалось, что пробой происходил не между электродами, а направлялся вертикально вверх от одного из

электродов и распространялся по поверхности воды, проходя более 300 *мм* до проводника второго электрода. Подобные скользящие по поверхности жидкости разряды в отдельных опытах проходили путь до 500 *мм* и более.

Таблица 2

Условия выполнения разрядов

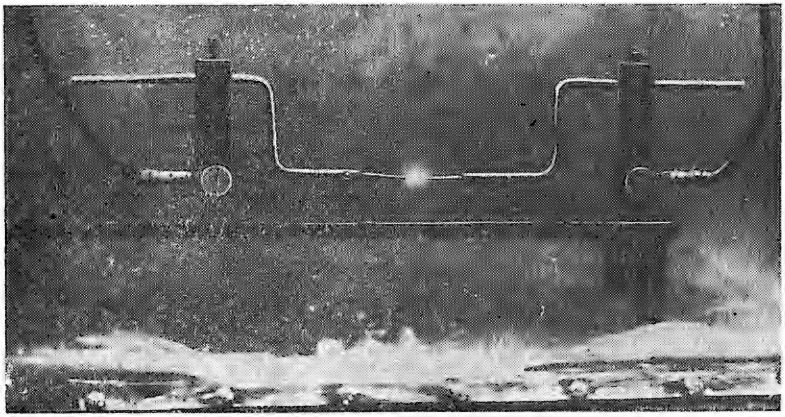
№ фигуры	Напряжение *кв*	Емкость *мкф*	Длина искры *мм*	Схема расположения электродов	Формирующие промежутки		Глубина погружения в *мм*	Примечания
					левый (+) *мм*	правый (−) *мм*		
5	30	0,2	10	Линейное	10	10	300	Один разряд
6	30	0,7	10	„	10	10	300	То же
—	40	0,7	40	„	15	15	300	„
—	40	0,7	45	„	10	10	300	Два последовательных разряда
—	70	0,7	100	„	15	20	300	Один разряд
—	70	0,7	135	„	12	18	300	То же
—	35	0,7	450	„	10	8	наверху	Скользящий по поверхности разряд
7	50	0,03	100	„	10	15	„	Скользящий разряд
—	50	0,03	100	„	10	10	„	То же
9	30	0,7	150	по фиг. 8	10	8	по. схеме	В воздухе — 50 *мм*, по поверхности — 50 *мм* и в воде — 50 *мм*
11	40	0,7	105	по фиг. 10	10	10	„	В воде — 25 *мм*, по поверхности — 55 *мм* и снова в воде — 25 *мм*

Своеобразный характер носят скользящие разряды, получавшиеся при питании от электрофорной машины.

Как видно из фотографии (фиг. 7), в направлении разрядных путей от положительного полюса машины отсутствуют закругления; изменения направления путей разряда происходят под типовыми углами (*2*, фиг. 7), наблюдаются повороты искр, которые сразу же после изменения направления кажутся как бы поставленными на ребро — суженными, а затем, после нового изменения направления, выпрямляются и как бы ложатся плашмя. Любопытны также видимые на снимке как бы покрытые «усиками» шаровидные светящиеся образования (*1*, фиг. 7), диаметр которых достигает 5—6 *мм*.

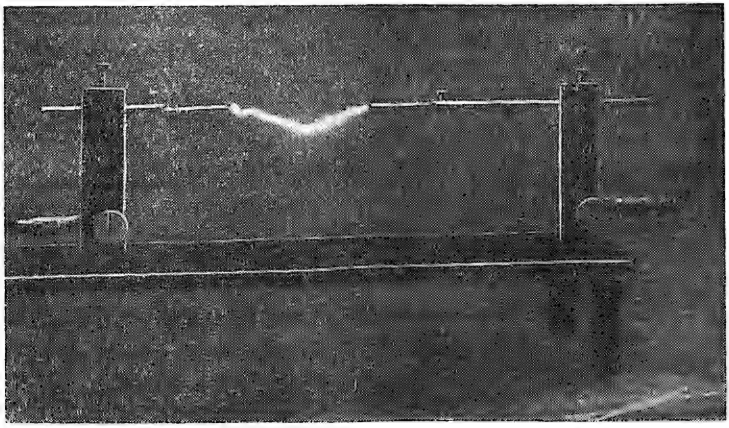
Несмотря на перемешивание жидкости место образования их сохраняется постоянным от разряда к разряду, а положение совпадает с неровностями второго электрода, лежащего на дне ванны.

Сбоку шаровые образования иногда имеют слегка конусную форму, «усики» отдельных шаров часто завиты спиралью.



Фиг. 5. Вид разряда длиной 10 *мм* в воде, снятого через прозрачную стенку ванны. Здесь, как и на последующем снимке, слева электрод (+), справа (—).

Шаровые разряды не связаны с проходящими рядом зонами линейных разрядов; характер и последовательность их образования определяются соотношением величин формирующих про-

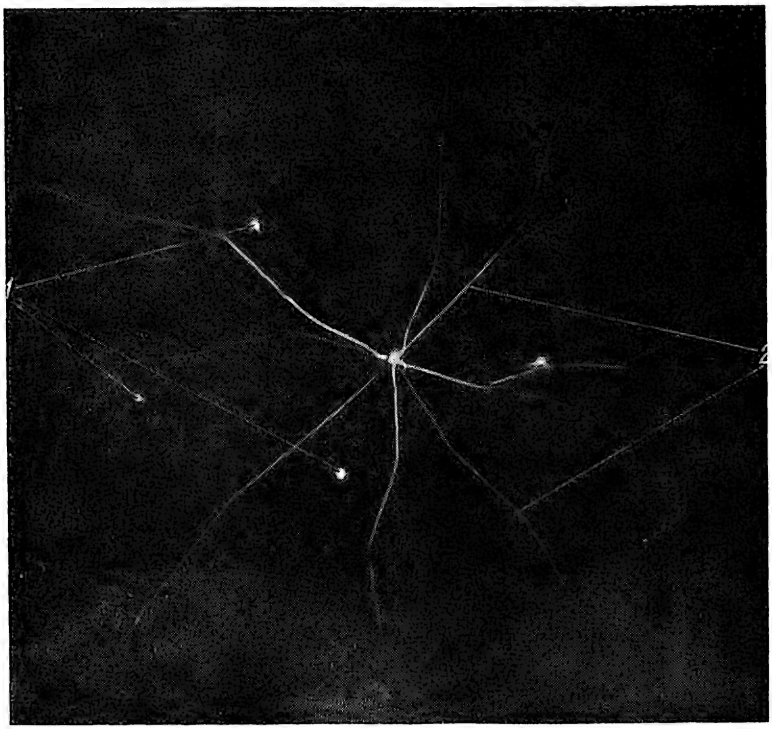


Фиг. 6. Разряд длиной 100 *мм* в воде.

межутков и в данном случае свидетельствуют о разновременности их пробоя. Разряды от отрицательного полюса, прямолинейные в начале путей, к концу их отклоняются вправо и влево с одинаковой кривизной, захватывая до $^3/_4$ окружности, являющейся, повидимому, частью спирали.

Основной источник питания позволил осуществить еще целый ряд своеобразных разрядов, схемы и фотографии которых приведены на фиг. 8, 9, 10 и 11.

Своеобразный тип разряда наблюдался при одном из опытов, когда положительный электрод имел форму острия, а отрицательный — диска. При установке диска от острия на расстояние, заведомо превышавшее пробивное, внутри жидкости можно было

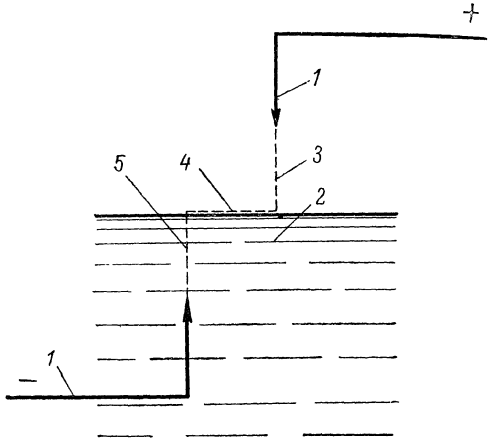


Фиг. 7. Скользящие разряды от положительного электрода электрофорной машины с длиною путей до 100—120 *мм*.

наблюдать мощные «кистевые» разряды, исходившие при каждом импульсе от острия. Каждая кисть состояла из 5—10 бледнофиолетовых «усов» длиной до 100—150 *мм* и толщиной примерно до 8—10 *мм*.

«Усы» кистей очень медленно колебались, изгибаясь около среднего положения. На их концах находилось большое число мелких (1—2 *мм*) газовых шариков; по прекращении разряда они всплывали, частично исчезая по пути.

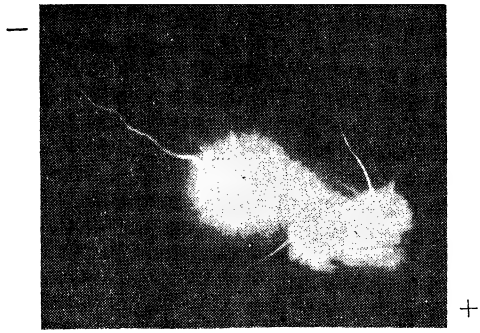
Кисти размещались в объеме конуса, имевшего основанием диск, а вершиной — острие второго электрода.



Фиг. 8. Схема разряда для случая нахождения одного из электродов (—) в воде, а другого (+) над поверхностью.

Разряд проходит 50 *мм* по воздуху, 50 *мм* по поверхности и уходит вглубь воды на 50 *мм* до второго электрода.

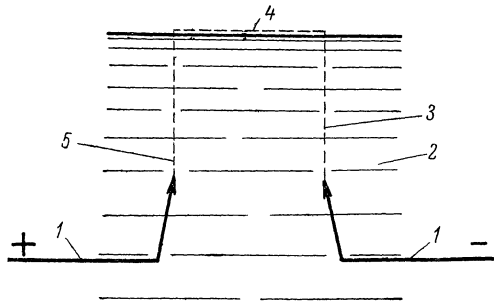
1 — электроды; *2* — вода; *3* — путь разряда по воздуху; *4* — путь разряда по поверхности воды; *5*—путь разряда в воде.



Фиг. 9. Вид сверху на разряд, протекавший по схеме фиг. 8.

Справа — путь в воздухе; слева — путь вниз, в воду; между ними — путь по поверхности воды.

Кистевые разряды в жидкости, подобные описанным выше, осуществлялись нами во многих растворах электролитов, а также в полимеризующихся жидкостях. Разряд сопровождался либо окрашиванием зоны, либо появлением осадка, вплоть до возникновения студенистых коллоидальных образований при ударах.



Фиг. 10. Схема разряда, прошедшего 25 *мм* в воде, затем 55 *мм* по ее поверхности и снова ушедшего в воду на глубину 25 *мм* до второго электрода:

1 — электроды; *2* — вода; *3* и *5* — путь разряда в воде; *4* — путь разряда по поверхности воды. Расстояние между концами электродов в воде по прямой 55 *мм*.

К числу оригинальных форм разряда относится безэлектродный разряд по поверхности жидкости, полученный по той же схеме, что и на фиг. 10, но при несколько большей глубине погружения электродов, чем нужно для возникновения пробоя. При возникновении разрядов в формирующих промежутках на поверхности жидкости появлялись кистевые разряды. Они направлялись к концам электродов, находящихся под водой, из точки, лежащей на поверхности жидкости между электродами, и имели форму двух узких «метелок» бледнофиолетового цвета, соединенных основаниями. Длина их, в зависимости от напряжения, достигала 50—80 *мм*.

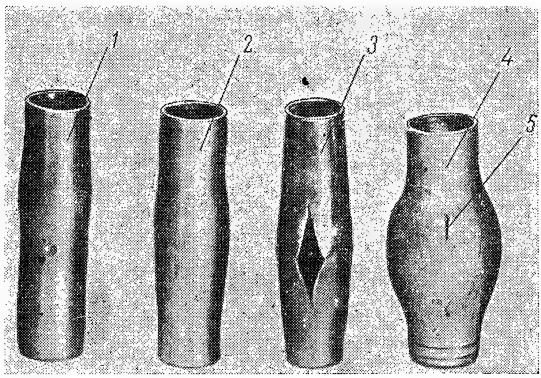
Фиг. 11. Вид сверху на разряд, протекавший по схеме фиг. 10.

Механическое воздействие электрогидравлических ударов, проявлявшееся во всех случаях, воспроизводилось в опытах на самых разнообразных материалах с помощью различных устройств. В одном из них на электроды надевались сжимаемые слабой пружиной текстолитовые конусы, между которыми устанавливалась короткая металлическая трубка, центрированная этим относительно электродов. Концы электродов сближались внутри трубки на расстояние, меньшее диаметра последней, чтобы избежать пробоя на ее стенки; затем устройство погружалось в жидкость и на электроды подавались импульсы. После одного-двух ударов на трубке появлялось вздутие, увеличивавшееся с каждым ударом. После 5—6 ударов трубка обычно лопалась по образующей. На

отожженных трубках удавалось произвести до 10—15 ударов, причем получалось значительное вздутие без их повреждения.

На фиг. 12 показаны образцы раздутых латунных трубок длиной 100 *мм*, диаметром 25 *мм* и толщиной стенки 2 *мм*. После раздутия трубки заметно укорачивались. Из-за несовершенства устройства место раздутия у каждого удара часто не совпадало, что видно на фотографии.

Разрыв одной из трубок, показанных на фиг. 12, произошел вследствие пробоя жидкостью газового пузырька, задержавшегося на выпуклости трубки, хотя раздутие и производилось в наклонном положении.



Фиг. 12. Внешний вид раздутых латунных трубок:

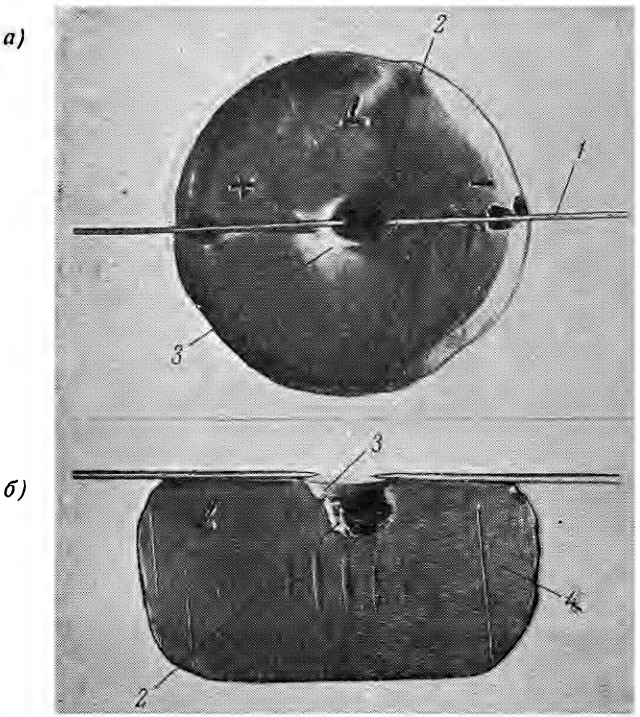
1 — после двух ударов в разных местах; *2* — после трех ударов в разных местах; *3* — разрыв трубки от четырех стабильных ударов; *4* — раздутие трубки от девяти стабильных ударов с отжигом после каждых трех ударов; *5* — местная выпуклость и разрыв на трубке от пробоя воздушного пузырька.

Появление разрывов на месте газовых пузырьков представляет известный интерес. В описываемых опытах они образовались вследствие малой длины основного промежутка и большой емкости; в других случаях пузырьков не наблюдалось.

Число ударов, необходимых для раздутия трубки, пропорционально толщине ее стенки. Скорость раздутия и величина его зависят от свойств материала трубки. Эти факты, установленные опытом, должны играть серьезную роль в работе устройств, использующих электрогидравлический эффект, что должно учитываться при их конструировании.

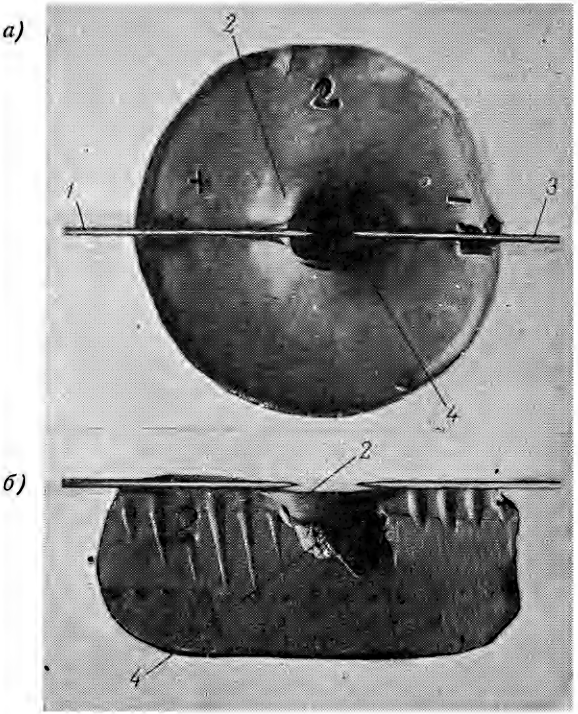
Осуществляя разряд от электрофорной машины в тонком слое жидкости между двумя плотно сжатыми листами стекла размером 150 × 150 *мм* и толщиной 5—7 *мм*, мы наблюдали, что электрогидравлические удары оказались не в силах преодолеть силу слипания. Листы остались в покое, но из каждого было выбито в противоположные стороны по куску стекла, довольно точно воспроизводившего вид и форму одной из зон, показанных на фиг. 4. Диаметр каждого выбитого участка составлял 40—50 *мм*. Остальной лист стекла остался целым, без трещин.

Если искровой разряд в воде пробивал на своем пути лист бумаги или картона, то на нем наблюдались отверстия с рваными краями, выгнутыми всегда в одну сторону — по направлению к отрицательному электроду.



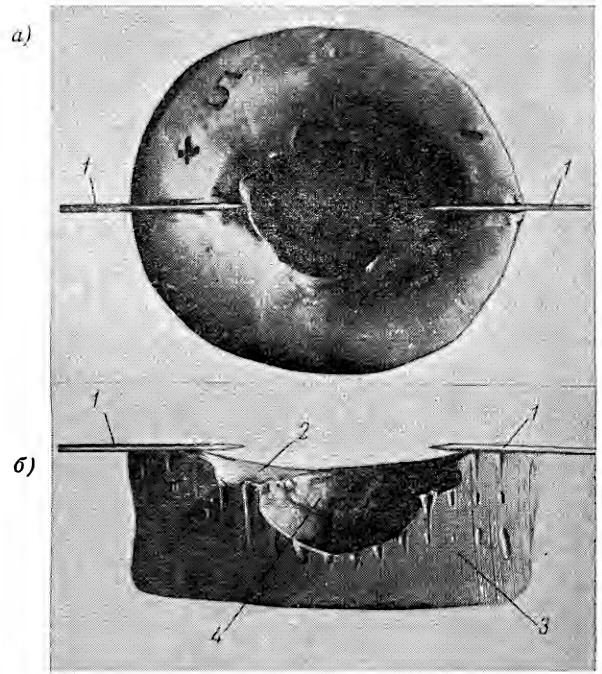
Фиг. 13. Пластиграфический отпечаток разряда на диске (электроды находятся на его поверхности): *а* — вид сверху; *б* — разрез.

1 — электроды; *2* — след удара кавитации; *3* — след основного удара; *4* — пластилин.



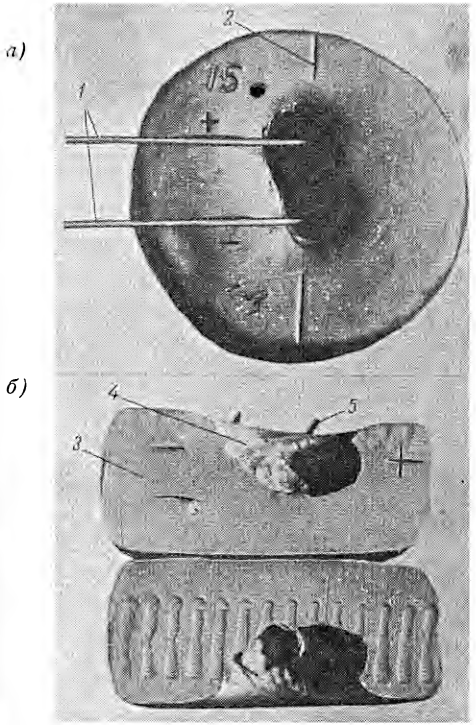
Фиг. 14. Пластиграфический отпечаток разряда на диске (электроды находятся на его поверхности): *а* — вид сверху; *б* — разрез.

1 — положительный электрод; *2* — след основного удара; *3* — отрицательный электрод; *4* — след кавитационного удара.



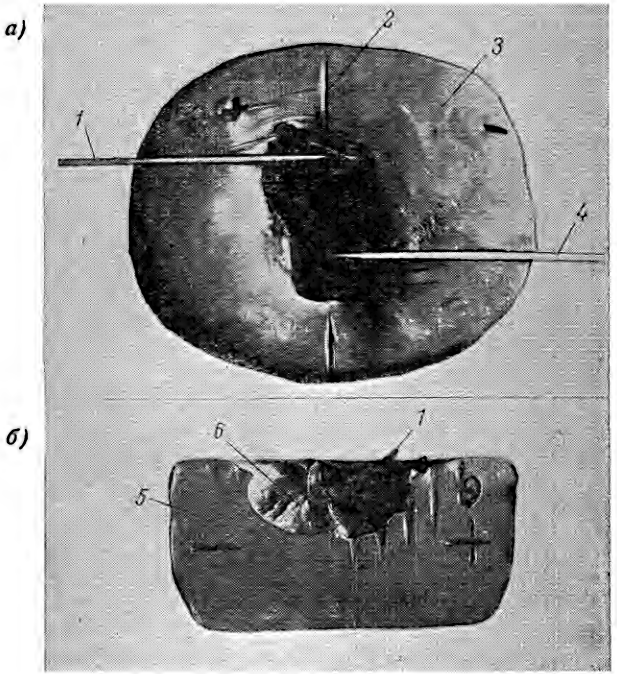
Фиг. 15. Пластиграфический отпечаток разряда на диске (оба электрода расположены на поверхности): *а* — вид сверху; *б* — разрез.

1 — электроды; *2* — след основного удара; *3* — пластилин; *4* — след кавитационного удара.



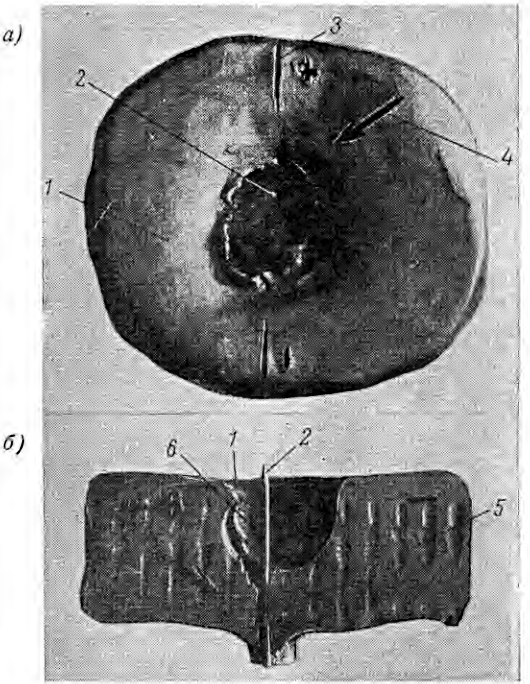
Фиг. 16. Пластиграфическое действие одного удара (параллельное расположение электродов): *а* — вид сверху; *б* — разрез.

1 — электроды; *2* — линия разреза диска; *3* — пластилин; *4* — след кавитационного удара; *5* — положительный электрод.



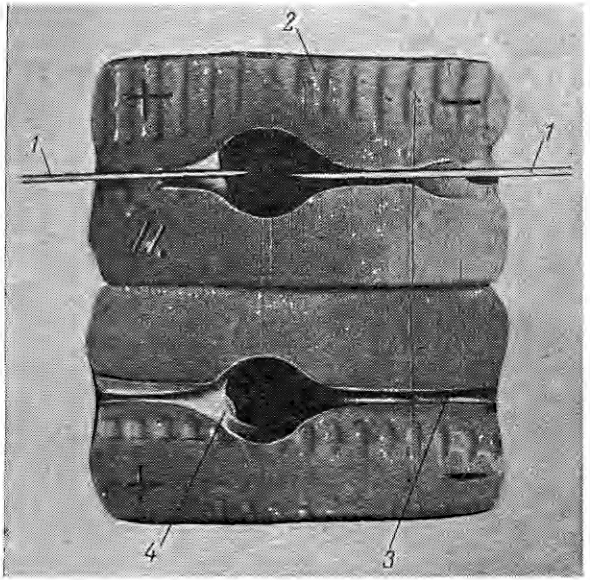
Фиг. 17. Пластиграфическое действие одного удара (смещенно-параллельное расположение электродов): *а* — вид сверху; *б* — разрез.

1 — положительный электрод; *2* — линия разреза диска; *3* и *5* — пластилиновый диск; *4* — отрицательный электрод; *6* — след кавитационного удара.



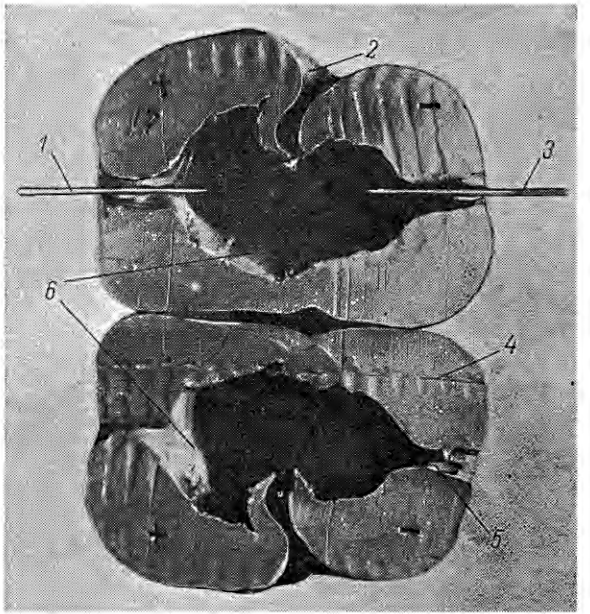
Фиг. 18. Пластиграфия действия одного удара (разряд, перпендикулярный поверхности пластилинового диска): *а*—вид сверху; *б*—разрез.

1 — слабый след действия основного удара в виде чашки; *2* — отрицательный электрод; *3* — линия разреза диска; *4* — направление, в котором был наклонен верхний (положительный) электрод; *5* — пластилин; *6* — след кавитационного удара.



Фиг. 19. Пластиграфия действия одного удара внутри цилиндра:

1 — электроды; *2* — пластилиновый цилиндр; *3* — центральный канал; *4* — полость кавитации — след действия основного удара.



Фиг. 20. Пластиграфия действия одного удара внутри цилиндра:

1 — положительный электрод; *2* — прорыв языка кавитационного удара; *3* — отрицательный электрод; *4* — пластилин; *5* — центральный канал; *6* — стенка полости.

При разряде от электрофорной машины через воздух и слой керосина, налитый сверху на слой воды, насыщенной какими-либо солями и хорошо проводящей ток без образования разряда, из «отверстия», пробитого в слое керосина, вылетал газовый факел. Он был голубовато-зеленого цвета и часто самовоспламенялся (видимо от той же искры), после чего с резким хлопком сгорал. При толщине слоя воздуха 30 *мм* и керосина 15 *мм*, при $C = 0{,}3$ *мкф* и формирующих промежутках 5 и 15 *мм* факел имел длину до полуметра и около 80—100 *мм* в наибольшем сечении.

Опыты с силовой установкой мощностью в 1,5 *квт* показали, что если к положительному электроду разрядника, выполненному в виде острия, электрически подключить металлический элемент с большой поверхностью, то при любых доступных в опыте значениях тока и емкости разряда между электродами не возникает. Подключение той же поверхности к отрицательному электроду не влияет на развитие и протекание разрядов между электродами.

Это наблюдение указывает на возможность выпрямления переменных по направлению импульсов несложным устройством, состоящим из помещенного в жидкости разрядника, у которого отрицательный электрод выполняется в виде элемента большой поверхности, снабженной острием, а положительный электрод — в виде обычного острия.

В последующем удалось установить, что изоляция положительного электрода, кроме небольшой части его острия, позволяет пробивать при тех же напряжениях в 10—30 раз большие разрядные промежутки в воде, чем без этой изоляции.

Практически оказалось, что применение изоляции положительного электрода при одинаковых напряжениях позволяет пробивать почти втрое большие толщины воды, нежели воздуха.

Явление это легко объясняется резким снижением общей проводимости воды за счет ионов водорода, в основном ее определяющих.

Было установлено также, что заземление части разрядно-зарядного контура до формирующих промежутков вызывает значительные утечки и снижение эффективности установки.

Удалось показать, что заземление может быть определенно рекомендовано только для схемы с двумя формирующими промежутками и тем более, если оно осуществлено в разрядной части, за формирующими промежутками, и заземлен отрицательный электрод.

При разряде от установки мощностью 1,5 *квт* на небольшой глубине от поверхности жидкости вода в виде конусообразной «чашки» вылетала вверх, а в образовавшееся углубление устремлялся воздух. Струя воздушных пузырей с шипеньем направлялась ко дну ванны, ударяясь об него и поднимаясь к поверхности.

При единичном разряде, происходившем на глубине около 200—300 *мм* под поверхностью жидкости, вверх вылетало до 10—15 *л* воды, с силой ударявшейся о потолок на высоте 5 *м*.

Воздушный удар вызывал бурное движение и сильное расплескивание воды в ванне, вмещавшей свыше 400 *л*.

Это явление чисто «воздушной кавитации» характерно для электрогидравлических ударов от разрядов более 70 *мм* длины, так как их в приведенных опытах не удавалось погрузить глубже 400—500 *мм* из опасения разрушить ванну.

6. Пластиграфический метод изучения электрогидравлического эффекта

В процессе исследований нами был разработан метод изучения электрогидравлических ударов, очевидно, пригодный и для выявления ряда закономерностей других явлений, протекающих в жидкости, например: процессов электрообработки, протекания взрывов, кавитационных процессов и других.

Этот метод, названный нами «пластиграфическим», состоит в фиксации действия электрогидравлических ударов на объекты из пластилина, располагаемые соответствующим образом относительно разряда.

При этом в пластилиновых дисках образуются и сохраняются для последующего наблюдения углубления (вмятины), передающие форму и конечные размеры возникшей ударной волны.

Кроме дисков, разряды осуществлялись также в погруженных в воду цилиндрах из пластилина, внутрь которых через сквозные отверстия были пропущены электроды. В этом случае при той же длине промежутка отмечалась необходимость повышения пробивного напряжения.

Так, разряд длиной 50 *мм*, легко возникавший в воде при 40 *кв*, требовал в пластилиновом цилиндре 50—60 *кв*, а разряд длиной 120 *мм*, возникавший ранее при 50 *кв*, требовал теперь 60—70 *кв*.

При открытых ударах, создававшихся с одной стороны диска, на нем отмечались, кроме широких вмятин — следов ударной волны, другие, более глубокие вмятины с вдавленными и рваными краями — следы действия кавитационных ударов, односторонне заполнявших полость, сбразовавшуюся после разряда. С уменьшением глубины погружения разряда и пластилинового диска в жидкость действие кавитационного удара резко слабело, и глубина следа уменьшалась.

Аналогично сказывалось и увеличение длины разряда. При постоянной глубине погружения, с увеличением длины разряда, след кавитационного удара ослабевал, что являлось следствием эквивалентного уменьшения толщины жидкости, в которой развивался обратный кавитационный удар.

Разряды внутри массивных пластилиновых цилиндров были частично защищены от действия кавитационных ударов.

С увеличением длины разряда, когда полость внутри цилиндра становилась большой, а пластилиновая стенка ее тонкой, последняя оказывалась не в состоянии задержать действие кавитационного удара и вминалась внутрь.

Таким образом, пластиграфический метод позволил наблюдать действие объемных ударов кавитации и проследить за их протеканием, вплоть до отображения прорыва кавитационного удара внутрь образовавшейся полости.

Этим методом изучалось действие электрогидравлических ударов и сопровождающих их кавитационных явлений, при самом разнообразном расположении электродов и объекта.

После каждого единичного разряда пластилиновый диск или цилиндр фотографировались в положении сверху, затем разрезались и снова фотографировались в боковом положении.

Серия снимков (фиг. 13—20) выполнена в условиях, характеристика которых приведена в табл. 3. Расположение электродов видно на снимках. Кроме одного случая, описанного ниже, электроды находились на поверхности пластилина.

Пластиграфические отпечатки действия электрогидравлических ударов позволяют судить о распределении выделения энергии по длине искры.

Разряды внутри цилиндров свидетельствуют о том, что энергия выделяется по длине разряда, повидимому, совершенно равномерно; возможно некоторое увеличение ее выделения у концов искры, вблизи электродов.

Разряды на дисках дают возможность устанавливать бóльшую или меньшую активность выделения энергии у различных электродов.

Все приведенные снимки показывают результат действия электрогидравлического и сопровождающего его кавитационного ударов, возникающих в результате единичного импульса.

Вся полость образуется сразу, за один прием, никаких явлений газо- и парообразования не обнаружено. Опыты показали, что полости эти геометрически правильны, имеют гладкие стенки без каких бы то ни было асимметричных впадин или других неровностей.

Обнаруживаемая иногда складчатость вызывается следующим за расширением от основного удара сжатием полости действием кавитационного удара и становится заметной лишь при болъших объемах полостей.

Можно полагать, что зона разрушения (зона *Б*) имеет форму и размеры, близкие к форме и размерам полостей, приведенных на фотографиях.

Для работы многих устройств, использующих эффект, факт образования полостей, т. е. значительного линейного перемещения жидкости, имеет огромное определяющее значение по сравнению с ударной волной. Это касается и эффекта кумуляции, и работы форсунок, насосов и других устройств.

Почти во всех пластических материалах — битуме, варе, воске, глине и других — также образуются полости, но эти материалы либо эмульгируют (битум, глина), либо раскалываются (битум, вар, воск), либо образуют много вырванных частиц (воск, глина).

Таблица 3

Условия проведения опытов при пластиграфировании

№ фигуры	Режим						Примечания
	напряжение в *кв*	емкость *мкф*	длина разряда *мм*	Промежутки		глубина погружения в *мм*	
				левый (+) *мм*	правый (—) *мм*		
13	40	0,2	12	10	8	300	Заметна большая активность кавитации вблизи отрицательного электрода
14	40	0,7	12	13	11	300	Кавитация более активна у отрицательного электрода
—	40	0,2	30	10	10	100	Кавитационный удар резко ослаблен, основной удар, учитывая малую емкость, почти не изменился; активность кавитации та же
15	40	0,7	50	10	10	300	Оба удара четко выражены, нет преобладания активности у какого либо электрода
—	40	0,7	80	12	15	300	Кавитационный удар слабеет, так как слой воды в 300 *мм* недостаточен для его развития. Активность сильнее у отрицательного электрода
16	45	0,7	30	11	13	300	Кавитация активнее у положительного электрода
17	50	0,7	30	12	12	300	Кавитация более активна у отрицательного электрода
18	40	0,7	30	12	12	300	Верхний, положительный электрод наклонен под углом в 30° в направлении, указанном стрелкой на пластилине, что вызвало большую активность кавитации в этом направлении
19	45	0,7	12	15	15	300	Полость строго симметрична относительно электродов и искры
—	45	0,7	30	12	15	300	Полость строго симметрична относительно искры
20	65	0,7	55	15	15	300	Весь цилиндр сжат со всех сторон; отчетливо виден прорыв удара кавитации внутрь полости

Пластилин наиболее удобен потому, что он при комнатной температуре лишен ударной хрупкости, практически не эмульгирует, не растворяется в воде и не образует вырванных частиц.

Таким образом, обобщая изложенное, можно считать, что в результате проведенных опытов установлен ряд качественных зависимостей, а именно:

1) длина искры в воде в определенных пределах зависит от основной емкости контура;

2) возникновение пробоя в воде зависит от площади и полярности электродов. Увеличение соприкасающейся с водой площади отрицательного электрода благоприятствует развитию пробоя и получению длинной искры. В еще большей степени этому способствует уменьшение активной поверхности положительного электрода. В обратных случаях пробой вообще не наступает;

3) напряжение возникновения пробоя зависит от материала электродов, возрастая по ряду — сталь, дюраль, латунь, медь;

4) при прочих равных условиях длина искры в жидкости возрастает с увеличением крутизны фронта импульса;

5) возникновение пробоя зависит от концентрации электролитов в воде, но чем круче фронт и короче волна, тем при большей концентрации возникает разряд;

6) разрушающий эффект зависит от формы и особенно от крутизны фронта импульсов, на что влияет изменение: а) длины всех промежутков; б) амплитуды токов и напряжений; в) емкости C, сопротивления R и самоиндукции L разрядного контура и особенно правой его половины; г) C, R и L, подсоединенных параллельно основному промежутку;

7) однозначность повторений эффекта при каждом разряде зависит от режима работы контура; по пластиграфическим данным разброс значений может быть выявлен повидимому только осциллографированием;

8) утечки на заземление за формирующими промежутками и особенно для ветви отрицательного электрода — практически незначительны.

ГЛАВА III

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

7. Электрогидравлические долота и бурильные устройства

А. Электрогидравлическое долото

Для исследования разрушения неметаллических материалов электрогидравлическим способом было изготовлено устройство, названное нами «электрогидравлическим долотом».

Долото состоит из текстолитового наконечника с выходящими из него электродами, сделанными из стальной проволоки ∅2 *мм*.

Наконечник насажен на текстолитовый стержень, свободно двигающийся во втулке, закрепленной на перекладине ванны. Для уменьшения подбрасывания долота после каждого удара (отдачи) на текстолитовый стержень помещается груз в 1,5 *кг*.

По включении тока между концами электродов возникают разряды, и долото погружается в испытуемый материал. Так, корундовый круг толщиной 100 *мм* прошивался за 3—4 мин. при частоте 50—60 импульсов в мин. и длине искры 25 *мм*. Внешний вид долота показан на фиг. 21.

Нами испытывалось также долото с длиной искры около 100 *мм*, но из-за быстрого разрушения ванны от него пришлось отказаться.

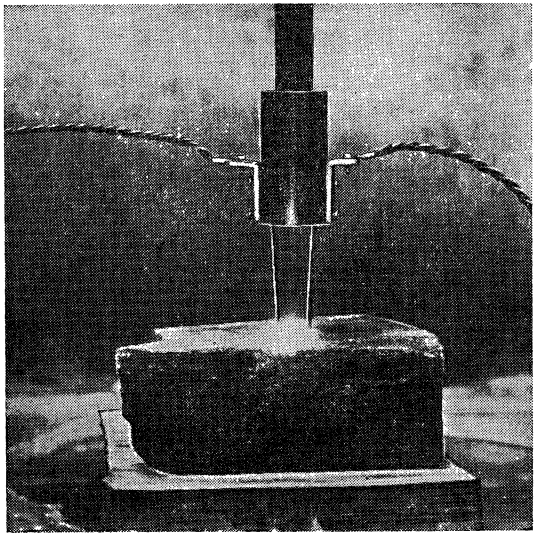
При работе на переменном токе с частотой 100 ударов в сек. испытывались также небольшие долота с длиной искры 8—10 *мм*. Абразивные круги любой прочности прошивались такими долотами на глубину 40—50 *мм* за 2—3 сек., при потреблении мощности установкой 100 *вт*.

Раздробленная порода за редким исключением представляет мелко дисперсную крошку с зерном не более 1—2 *мм*.

Заметно медленнее тем же долотом долбятся диабаз и мрамор (3—5 *мм/мин* при 200 *вт*).

Легко, со скоростью 15—30 *мм/мин*, долбятся кварц, стекло и другие хрупкие материалы.

Породы с проводящими или полупроводящими включениями долбятся с увеличенной скоростью.



Фиг. 21. Долото в ванне в процессе работы в начале долбления. Внизу на концах электродов видны разряды.

(Снято сквозь стенку ванны).

Мелкокристаллические породы и вещества типа твердых растворов долбятся легче крупнокристаллических, волокнистых и некоторых слоистых пород.

Для разрушения горных пород определяющей будет не твердость породы, а ее хрупкость.

Б. Электрогидравлический бур

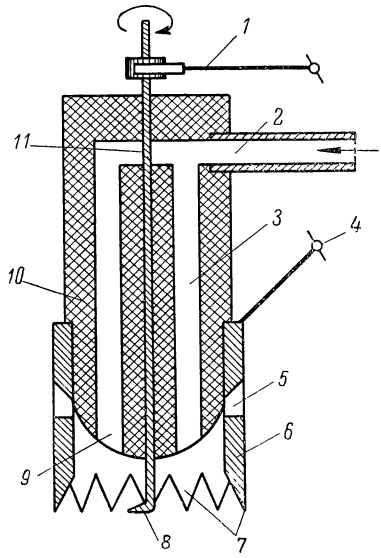
Для получения правильных отверстий в непроводящих материалах было сконструировано специальное устройство, показанное на фиг. 22.

Внутри металлической трубки-коронки, зазубренной с торца, помещен текстолитовый изолятор, имеющий отверстие для промывочной жидкости.

В центре изолятора, в трубчатом подшипнике, свободно вращается электрод (+), ток к которому подводится скользящим контактом. Нижний конец электрода отогнут под прямым углом на 5—10 *мм*. Вблизи торца трубка имеет отверстия для выхода случайно образовавшихся газов и паров.

При подаче импульсов напряжения на трубку-коронку и электрод между отогнутым концом последнего и ближайшим к нему зубцом коронки возникают разряды.

При вращении электрода от специального двигателя эти разряды последовательно, с зубца на зубец, обегают периметр нижнего торца трубки, все время остающейся неподвижной. Возникающими при каждом разряде электрогидравлическими ударами разрушается порода, на которую поставлена трубка.



Фиг. 22. Схема конструкции одного из вариантов бура сплошного забоя.

1 — подвод тока к центральному вращающемуся электроду; *2* — трубопровод подачи промывочной (и рабочей) жидкости; *3* и *9* — каналы для подачи промывочной жидкости в теле бура; *4* — подвод тока к коронке бура; *5* — отверстия — окна в коронке бура для выхода газов; *6* — коронка бура; *7* — зубцы тыльного торца коронки; *8* — отогнутый под прямым углом кончик центрального электрода; *10* — изолятор; *11* — центральный вращающийся электрод (+).

Измельченная порода выходит между зубцами и через зазор между трубкой и стенками отверстия, откуда может вымываться водой, принудительно подаваемой через полость устройства.

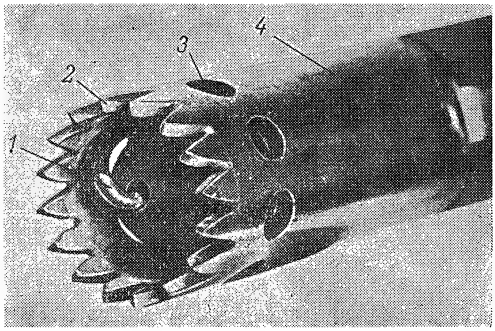
Электрогидравлический бур, оставаясь неподвижным (кроме нижней части электрода), проделывает отверстия правильной круглой формы в любых непроводящих материалах.

Испытанная модель устройства имела двигатель мощностью 3 *вт*, вращавший электрод со скоростью 10 об/мин. Бур питался импульсами при емкости 0,2 *мкф*; длина формирующих промежутков 10 и 10 *мм*; напряжение 25—30 *кв*.

Диаметр трубки составлял 30 *мм*, а отверстия в породах различной прочности получались диаметром от 40 до 50 *мм*, что исключало возможность заклинивания. Стенки отверстий не были гладкими, но имели шероховатости в допустимых пределах.

Сверху бура помещался груз в 1,5 *кг*; общий вес бура составлял 2,5 *кг*. Высота подбрасывания не превышала 5—10 *мм*, уменьшаясь при погружении в породу до 3 *мм*. Но при повышении частоты ударов устройство как бы «повисало» над забоем.

Погружение бура в породу осуществляется его собственным весом; с этой целью он свободно передвигается в направляющих, установленных на перекладине ванны.



Фиг. 23. Вид нижнего конца головки-коронки бура, проделавшего пять отверстий глубиной по 80 *мм* в твердом корундовом круге:
1 — отогнутый кончик центрального электрода; *2* — зубец торца коронки; *3* — отверстие — окно в коронке бура для выхода газов; *4* — тело бура.

Одним из существенных элементов конструкции бура является вставка из мягкой резиновой трубки, окружающей трубчатый подшипник центрального электрода и выступающей за нижний конец текстолитового корпуса головки. Резиновая вставка таким образом частично входит в зону разрушения, так как текстолит в зоне разрушения быстро выходит из строя.

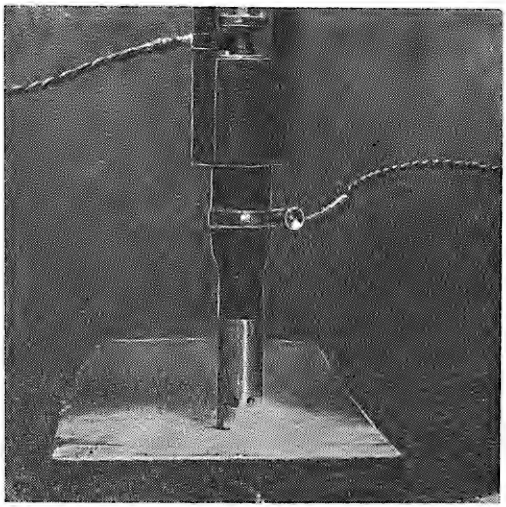
Нижний конец головки, проделавшей пять отверстий глубиной 80 *мм* каждое в твердом крупнозернистом корундовом абразивном круге, показан на фиг. 23.

Как видно из фотографии, никаких следов эрозии или истирания ни трубка, ни центральный электрод не имеют, хотя они выполнены из мягкой стали.

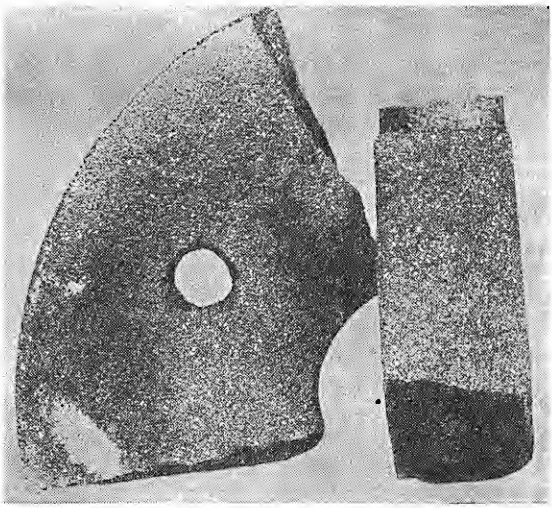
На фиг. 24 показана другая модель бура в ванне в момент начала проходки отверстия. С одного края трубки хорошо видны разряды, обегающие затем весь периметр торца. Образец работы этого бура представлен на фиг. 25, где показано отверстие, проделанное в корундовом абразивном круге.

Как выявлено исследованиями, бур может проделывать отверстия даже в эластичных материалах, например, в мягкой резине. Последняя вырывается кусками с резкими, как бы от хрупкого излома, краями. Глубина выемок составляет 5—6 *мм*.

Опыты показали, что после углубления в породу и перехода затем на режим с большей емкостью можно получить разрыв



Фиг. 24. Вид бура в начале забуривания. Внизу коронки бура видны разряды.
(Снято сквозь стенку ванны).



Фиг. 25. Отверстие ∅ 40 *мм*, образованное буром в корундовом круге.

либо всего образца породы, либо одной нижней части его. Это позволяет с помощью той же силовой установки проходить отверстия на небольшую заданную глубину, с последующим затем гидравлическим «взрывом» выполненного шпура двумя-тремя ударами на большей емкости.

В табл. 4 приведены данные о фактической и расчетной скорости прошивки различных пород.

Поскольку частота в 100 *гц* не является предельной и легко могут быть получены частоты 500—1000 *гц*, можно полагать, что скорость проходки отверстий в горных породах и аналогичных материалах может быть значительно повышена.

Таблица 4

Скорость проходки различных материалов и пород электрогидравлическим буром

при длине искры 7 *мм* и частоте импульсов 120 в мин.

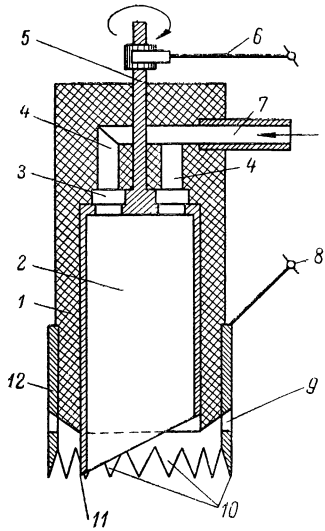
Напряжение *кв*	Емкость *мкф*	Промежутки		Порода или материал	Скорость углубления в *мм/мин* при частоте	
		левый (+) *мм*	правый (−) *мм*		2 *гц* (опытн.)	100 *гц* (расчетн.)
30	0,1	15	15	Техническая резина [1]	0,5	0,5
30	0,1	15	15	Мостовой диабаз	3	150
30	0,1	15	15	Мрамор белый	10	500
25	0,2	10	10	Стекло зеркальное	15	750
25	0,2	10	10	Кварц плавленый	20	1 000
25	0,2	10	10	Корундовый круг	30	1 500
25	0,2	10	10	Глинистый кварцитовый сланец	50	2 500
25	0,2	10	10	Глина кембрийская [2]	120	6 000
25	0,5	10	10	Грунт суглинок [2]	250	12 500

[1] Бур вязнет в лохмотьях резины.
[2] Скорость бурения может быть выше при большем весе бура.

В. Бур для выемки образцов

Для получения кольцевых отверстий с центральным керном была опробована модель бура, схема которого показана на фиг. 26.

Вращением со скоростью 10—15 об/мин. внутреннего цилиндра, имеющего нижнюю кососрезанную часть, играющую роль разрядного острия, достигается обегание периметра коронки — торца разрядами между острием цилиндра и ближайшим зубцом коронки.



Фиг. 26. Схема одного из вариантов конструкции устройства для образования кольцевых отверстий с центральным керном:

1 — текстолит-изолятор; *2* — полость, куда входит керн; *3* — выход канала для промывочной и рабочей жидкости; *4* — канал для подачи жидкости; *5* — ось внутреннего вращающегося цилиндра — электрода; *6* — подача тока к центральному электроду; *7* — трубопровод подачи жидкости; *8* — подача тока к коронке бура; *9* — отверстия в коронке для выхода газов; *10* — зубцы коронки — торца; *11* — выступ нижней кососрезанной части внутреннего вращающегося цилиндра — электрода; *12* — коронка бура.

Образующийся при прошивке керн входит во внутреннюю полость цилиндра и затем может быть извлечен; вода подается через отверстие в теле бура.

С помощью подобного бура практически представляется возможным получать отверстия любого диаметра. Для работы данного устройства, при ширине забоя 50—80 *мм*, не потребуется напряжений более 50 *кв*.

Опытом также показано, что при напряжении 70—100 *кв*, емкости 0,7—1,0 *мкф* и разрядах длиной до 220—250 *мм* существует возможность получения отверстий сплошного забоя диаметром до 450—500 *мм*.

Как уже отмечалось, твердость пород не имеет значения для образования в них отверстий предлагаемым способом,

8. Электрогидравлические режущие устройства

Для исследования возможности размерной резки нетокопроводящих материалов нами было сконструировано приспособление, позволившее проводить опыты резки кварцевого стержня, керамических и фарфоровых труб и подобных материалов.

Сбоку, к приведенному в медленное вращение кварцевому стержню специальной прижимной пружинкой придвигался особый «резак». Концы его электродов, между которыми происходил разряд, непрерывно скользили по поверхности образца, следуя за ее неровностями при вращении.

Разрезаемый образец и резак помещались в ванну из оргстекла, наполненную водой.

На фиг. 27 показаны три типа резаков, применявшихся при опытах.

Резание велось с частотой 100 ударов в сек. на переменном токе, при емкости 0,01—0,02 *мкф*, с потреблением мощности около 100 *вт*.

Эффект резания оказался чрезмерно сильным. В начале реза появлялись выбоины глубиной до 1—3 *мм* и шириной до 6 *мм*, а затем, на глубине 5 *мм*, они сужались до 2—3 *мм*. После 3—5 мин. разрезаемый кварцевый стержень раскалывался точно по линии реза. На установке разрезались также керамические и фарфоровые материалы.

Резание велось на напряжении около 30 *кв*, что значительно превышало потребное.

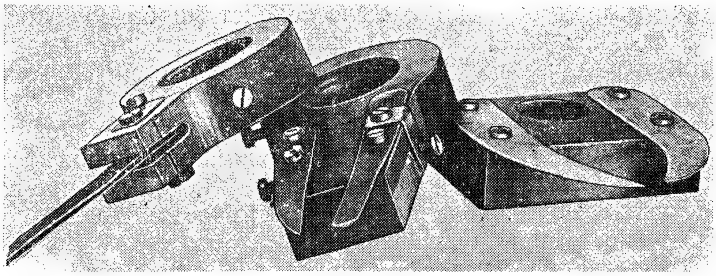
На фиг. 28 показан образец стержня диаметром 45 *мм* из плавленого кварца, по которому были сделаны три реза: верхний— при мощности порядка 300 *вт*, средний — при 150 *вт* и нижний— при 100 *вт*. Два последних надреза были сделаны на глубину 8—10 *мм*, после чего надрезанная пластинка сама скалывалась по резу.

При больших мощностях (до 300 *вт*) образцы перебивало пополам, прежде чем они успевали сделать полоборота. Показанный на фиг. 28 верхний конец образца представляет след подобного «реза».

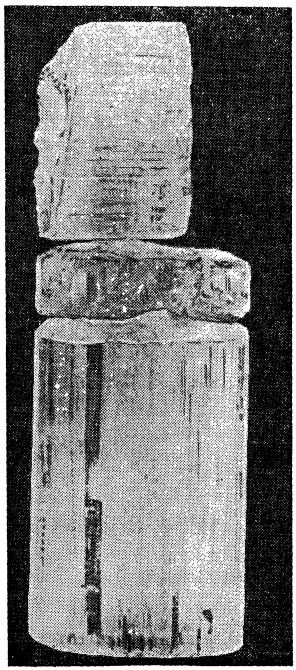
Опыты указали пути конструирования устройств для продольной и поперечной резки каменных монолитов при их вырезании из массивов или последующей обработке.

Так испытана конструктивно простая «электрогидравлическая фреза» для обработки плоскостей каменных монолитов.

Фреза представляет ряд укрепленных на текстолитовой планке последовательно соединенных искровых промежутков, вращающихся над обрабатываемой поверхностью и совершающих при этом параллельное ей поступательное движение. Испытание фрезы дало удовлетворительные результаты.



Фиг. 27. Три образца различных резаков, применявшихся при резке нетокопроводящих материалов в воде.



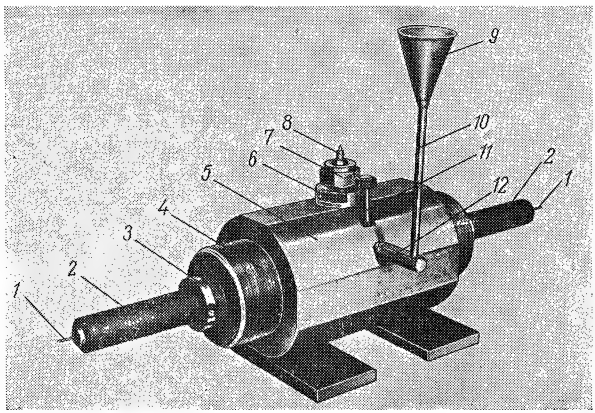
Фиг. 28. Вид и форма надрезов стержня плавленого кварца.
(Верхняя, сколовшаяся по надрезу часть стержня снята).

9. Электрогидравлические форсунки и насос

При герметизации сосудов, в которых возникают электрогидравлические удары, величина давления в них резко возрастает. Если в стенках этих сосудов проделать отверстия, то из них можно ожидать сильный выброс жидкости.

Это предположение дало основание исследовать применение электрогидравлического эффекта для подачи и распыления топлива в двигателях внутреннего сгорания.

Для опытов было изготовлено устройство, внешний вид которого показан на фиг. 29.



Фиг. 29. Устройство для подачи и распыления жидкостей:

1 — электрод-клемма; *2* — текстолитовый изолятор; *3* — зажимная шайба; *4* — втулка; *5* — корпус устройства; *6* — штуцер; *7* — прижимная гайка; *8* — дизельный распылитель; *9* — воронка для жидкости; *10* — трубка воронки; *11* — запорный кран; *12* — трубка к каналу в теле устройства.

Два длинных текстолитовых изолятора с электродами, проходившими внутри них, вставлялись на конусной посадке в две чашкообразные стальные втулки, входившие по резьбе внутрь стального цилиндрического корпуса.

Подобная конструкция позволяла легко изменять объем внутренней полости, а также менять длину основного искрового промежутка внутри цилиндра.

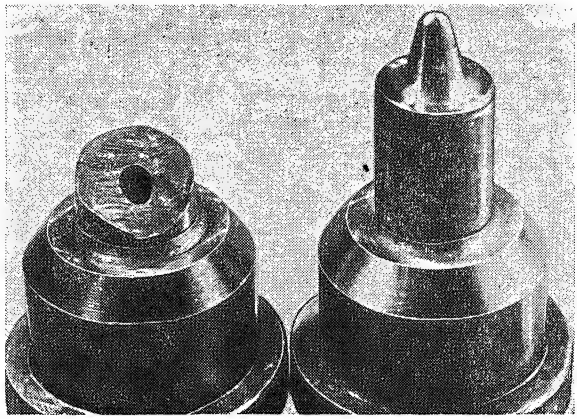
Сверху цилиндра навинчивался штуцер с отверстием 10 *мм*, на который ставились и крепились особой гайкой дизельные распылители обычного типа.

Жидкость через воронку подавалась самотеком по каналу, просверленному в теле цилиндра. Канал имел сечение от 5 до 8 *мм* и делал на своем пути два поворота под прямым углом. Эти повороты почти полностью глушили ударную волну давления, возникавшего внутри цилиндра. В дополнение к этому канал мог быть перекрыт специальным краном.

В описываемом устройстве слабым местом явилось крепление передних концов электродов, в результате чего после нескольких ударов они вырывались из тела изолятора и обламывались, разрушая последние и выводя из строя установку.

Повидимому, электроды вырывало действием ударных волн, отражавшихся от чашеобразных втулок и фокусировавшихся, в силу центрального положения электродов, на их концах, выступавших из текстолита. Другой вариант крепления, в котором это обстоятельство было учтено, оказался более надежным.

Внутренний диаметр цилиндра 100 *мм*, длина 250 *мм*, а переменный объем внутренней полости мог меняться от 800 до 1600 *см*^{3}. Внутри полости могли создаваться разряды длиной до 80 *мм*.



Фиг. 30. Разрушение дизельного распылителя: отрыв головки распылителя при искровом разряде длиной 20 *мм*.

При создании внутри описанного устройства искрового разряда длиной лишь в 20 *мм* наблюдался отрыв верхней части головки распылителя (фиг. 30), что по расчетам требовало усилия около 5 *т*.

Учтя, что давление, развиваемое в зоне искрового разряда, возникало в объеме более 1000 *см*^{3} и что сам разряд происходил на расстоянии около 100 *мм* от носика распылителя, можно заключить, что давление, развиваемое в данном объеме, неизмеримо выше того, которое вообще нужно для целей подачи топлива.

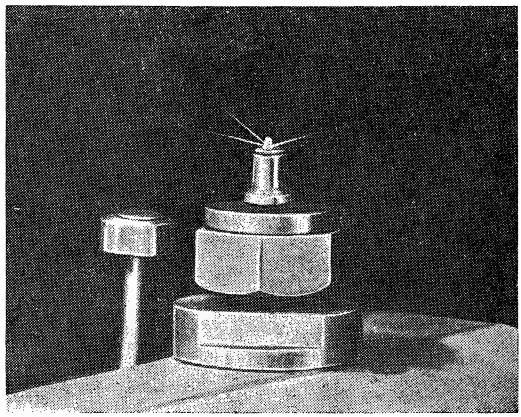
Уменьшение искры до 15 *мм* повлекло за собой отрыв носика распылителя, что также указывает на чрезмерность давления. Только при переходе к искре в 10—12 *мм* разрыв распылителей перестал иметь место, и устройство начало работать устойчиво.

Из носика распылителя через все шесть отверстий, диаметром 0,15 *мм* каждое, с частотой электрогидравлических ударов подавались тонкие струйки мелкораспыленной воды, вылетавшей

в виде голубоватых туманных факелов. Они быстро расширялись до 80—100 *мм* в диаметре и летели по радиусам на расстояние 300—400 *мм* от носика распылителя (фиг. 31).

При удаленном распылителе из отверстия в штуцере диаметром 10 *мм* вылетал конусообразный столб водяной пыли на высоту до 5 *м*. Диаметр пылевого факела у основания конуса доходил до 1 *м*, а количество жидкости, подаваемое за один удар, составляло около 50 *см*^{3}.

Если у распылителя спиливался носик таким образом, чтобы отверстие составляло 1—1,5 *мм*, то вылетавший факел водяной пыли достигал высоты 1,5—2 *м*; диаметр у основания конуса уменьшался до полуметра, а объем жидкости, выбрасываемой за удар,— до 2—5 *см*^{3}.



Фиг. 31. Факелы распыленной жидкости, отходящие от отверстий в носике распылителя.

Опыты, описанные выше, производились при напряжении около 30 *кв*, емкости 0,2 *мкф* и формирующих промежутках 8 и 8 *мм*, при частоте до 50 ударов в мин.

Испытывая при опытах различные жидкости, мы остановились из-за простоты на технической воде, тем более, что распыление ее, в силу высокого поверхностного натяжения, значительно труднее, чем бензина, керосина или мазута.

Мешающих процессу подачи и распыла явлений газо- и парообразования, при условии правильной настройки контура, не наблюдалось. Бесклапанная подача жидкости в полость распылителя, таким образом, также себя оправдала.

Из произведенных опытов следует, что подача топлива и распыление его, применительно к двигателям внутреннего сгорания, вполне возможны при длине искры 10—15 *мм*, емкостях не выше 1 *мкф* и напряжении 20—30 *кв*.

Указанное напряжение вполне достижимо с помощью крупных бобин зажигания и силовой установки, имеющейся в двигателях внутреннего сгорания.

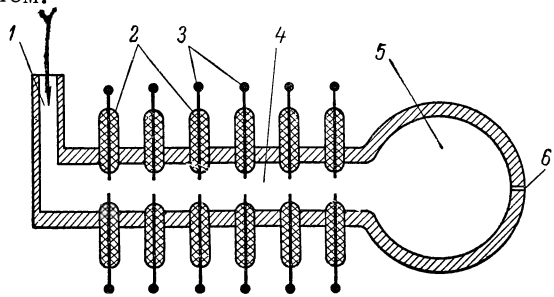
Создавая импульсы в первичной цепи и с помощью обычного трамблерного устройства распределяя их во вторичной, можно экономично получать и расходовать высокую мгновенную мощность, требующуюся для подачи и распыла топлива, учитывая,

что потребление ее за каждую минуту работы двигателя будет происходить только в течение нескольких секунд.

Другим устройством, исследовавшимся в грубой модели, является «электрогидравлический насос высокого давления» (фиг. 32).

В открытую с обеих сторон трубку, с одного ее конца, под небольшим давлением подается жидкость. По длине трубки на определенном расстоянии располагаются 5—7 или более искровых промежутков, каждый из которых является как бы ступенью сжатия.

Разряды, распределяемые трамблерным устройством, последовательно обегают весь ряд промежутков, повторяясь на первом из них, как только разряд, чередуясь, возникает на третьем или четвертом.



Фиг. 32. Схема варианта конструкции насоса высокого давления:

1 — подача жидкости самотеком; *2* — изоляторы; *3* — электроды; *4* — рабочая полость насоса; *5* — ресивер; *6* — отверстие малого диаметра для выхода струи.

Таким образом, в трубке к одному из ее концов начинают двигаться, постепенно повышая давление в жидкости, чередующиеся волны сжатия, в то время как по направлению к другому концу трубки такого движения нет.

Если к открытому концу трубки присоединить ресивер, то давление в нем будет нарастать, а волны, идущие к противоположному концу, имея обратное чередование и выход в атмосферу, быстро заглохнут.

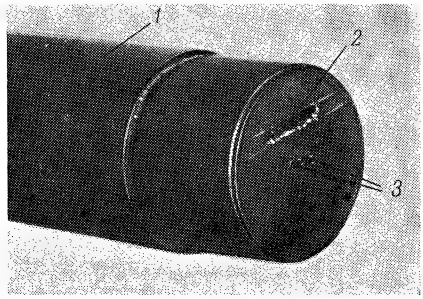
Придав объему вокруг каждого разрядного промежутка форму, при которой ударной волне будет легче следовать по направлению к ресиверу, нежели в обратную сторону (или снабдив установку специальными клапанами), можно достичь усиления эффекта.

Нами испытывалось устройство, имевшее лишь четыре искровых промежутка. Чередование импульсов на них осуществлялось с помощью трамблерного устройства. Внутренний диаметр трубки составлял 8 *мм*, искра имела длину 3—5 *мм*, при напряжении около 30 *кв*. В этом устройстве наблюдался сильный выброс жидкости из одного конца трубки при отсутствии выброса из другого конца, что свидетельствовало о направленном усилении давления и о том, что принцип насоса верен.

10. Прочие устройства

Из других опробованных устройств отметим устройство для правки абразивных кругов.

Жидкость, подаваемая через полость внутри текстолитового «пальца», вытекает в овальное отверстие на его переднем конце, над двумя тонкими электродами, расположенными на расстоянии 1,5 *мм* друг от друга.



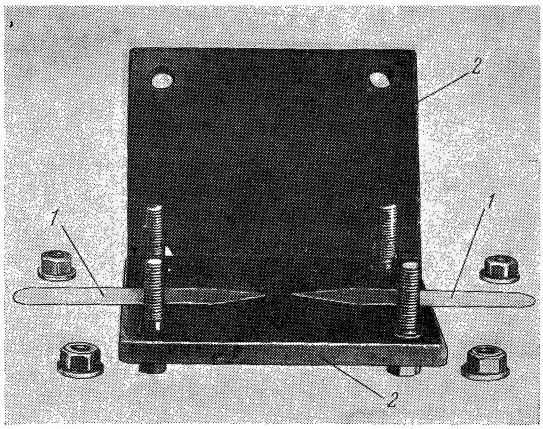
Фиг. 33. Передний конец головки устройства для обработки и правки абразивных кругов:

1 — тело устройства; *2* — отверстие для выхода рабочей жидкости; *3* — электроды.

Передняя часть пальца показана на фиг. 33. При вращении абразивного круга в непосредственной близости к головке между ними образуется прослойка жидкости, в которой и осуществляется разряд.

Наиболее пригодной для питания устройства оказалась индукционная катушка с прерывателем Венельта, без чего было затруднительно получать высокую частоту ударов, необходимую для правки быстро вращающегося круга.

В опытах было опробовано еще одно устройство, предназначенное для исследования стойкости текстолита в качестве мембраны акустического излучателя.



Фиг. 34. Устройство для исследования стойкости текстолита в качестве мембраны акустического излучателя в разобранном виде:

1 — электроды; *2* — текстолитовые пластины.

Между двумя толстыми пластинами текстолита помещались два пластинчатых электрода, после чего пластинки плотно стя-

гивались болтами и все устройство погружалось в воду на глубину 400 *мм*.

Вид устройства в разобранном виде показан на фиг. 34.

При разрядах в ванне наблюдалось появление водяного бугра высотой до 10 *см* над поверхностью воды.

В результате действия 100 ударов от искры длиной 20 *мм* на поверхности текстолита обнаружилось белое пятно, частично обнажившее ткань от слоя смолы. Текстолит при этом не разрушился.

Опытами показана также возможность получения надписей на твердых материалах при помощи электрогидравлического действия разряда.

Электрофорная машина, несмотря на незначительную мощность (около 3 *вт*), оказалась достаточной силовой установкой для этой цели, чтобы с емкостью в 0,005 *мкф* нанести надпись на термокорундовой фильере. Электрофорная машина позволяла получать удары через каждые 5—10 сек.

Буквы надписи выполнялись таким образом: оба электрода сближались вручную в нужной точке и удерживались там до разряда, каждый удар вызывал появление выбоины объемом около 0,1—0,2 $мм^3$.

В опытах осуществлялись также тепловые взрывы в воде тонких металлических проволок, испарявшихся от воздействия импульса. Возникавшие при этом гидравлические удары по внешним их проявлениям оказались сравнимыми с обычными. Это говорит о возможности их практического использования, например, для целей геофизики.

Нами ставились опыты по дроблению и измельчению различных твердых пород и других материалов. Полученные данные позволили приступить к созданию опытной камнедробилки и специальным исследованиям этого вопроса.

С несложным устройством от установки в 10—15 *вт* ставились опыты получения отверстий малого диаметра в твердых материалах: электрокорунд, кварц и др. Отверстий менее 3 *мм* пока получить не удалось. Скорость бурения составляла 1—2 *мм/мин*.

На этой же установке легко получались коллоидные растворы металлов в воде, бензине, эфире и других жидкостях.

ГЛАВА IV

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

По данным исследований представляется возможным практически использовать электрогидравлический эффект и в других областях техники. Здесь мы считаем необходимым упомянуть лишь о некоторых таких возможностях.

Опыты осуществления разрядов внутри поршневых устройств, заполненных жидкостью, обнаружили мощное толкающее действие, оказываемое на поршень электрогидравлическим ударом. Это позволяет говорить о возможности использования эффекта в конструктивно несложных, компактных ковочно-чеканных устройствах для холодной обработки металлов.

По этому же принципу могут быть созданы и малогабаритные ручные ударные и ударно-вращательные устройства — зубила, чеканы, ломы, лопаты, перфораторы.

Конструктивно должна быть предусмотрена возможность размещения внутри этих инструментов высоковольтной части схемы и питание созданных устройств импульсным током низкого напряжения.

Схема одного из таких ковочно-чеканных устройств показана на фиг. 35.

Надпоршневое пространство этого устройства имеет свободный выход в атмосферу через канал и резервуар, заполненный жидкостью. По этому каналу из полости цилиндра свободно удаляется то немногое количество газов и пара, которое может образоваться при регулировке устройства.

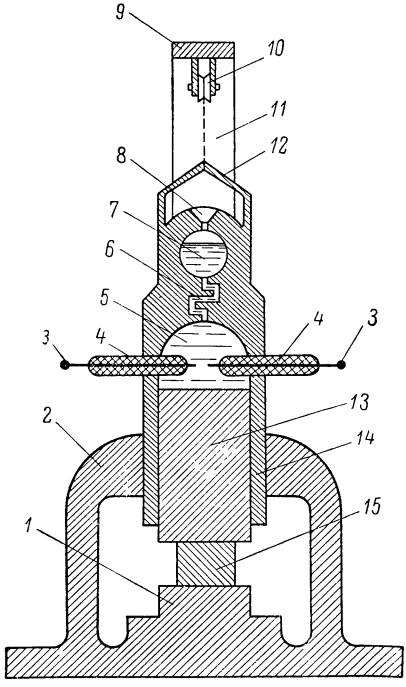
В одном из конструктивных вариантов устройство может, например, свободно опускаться на изделие и удерживаться на нем в работе собственным весом, осуществляя действием ряда быстро чередующихся ударов необходимую деформацию.

Масса поршня при такой конструкции должна быть значительно меньше массы всей поршневой системы, свободно лежащей на изделии.

Наличие нескольких прямоугольных поворотов канала, соединяющего полость цилиндра с резервуаром и атмосферой, полностью

глушит ударную волну и исключает потерю давления внутри цилиндра.

Исходя из опытов, в которых внутри объема около 1500 $см^3$ возникали средние давления заведомо более 2000 $а$, можно предполагать, что при площади поршня 100 $см^2$ общее давление, оказываемое на него ударом, превысит 200 $т$.



Фиг. 35. Принципиальная схема одного из вариантов конструкции ковочно-чеканного устройства:

1 — наковальня; *2* — станина; *3* — электроды; *4* — изоляторы; *5* — полость с жидкостью; *6* — канал — глушитель; *7* — резервуар с жидкостью; *8* — воронка; *9* — кронштейн; *10* — блок подвески; *11* — стойка кронштейна; *12* — серьги подвески; *13* — поршень; *14* — цилиндр; *15* — деформируемое тело.

Уплотнения цилиндра и поршня, камер, вводов и тому подобных элементов путем точной пришлифовки их друг к другу не являются обязательными в этих устройствах, как это имеет место в обычных условиях.

Необходимостью является только борьба с подтеканием, так как даже достаточно длинная щель шириной 1—5 *мм* является неодолимым препятствием для импульсов давления.

Однако обычные уплотнения в виде манжет и сальников необходимы во всех конструкциях насосов, как приведенного, так и других, например, построенных по типу однокамерного клапанного насоса с воздушным демпфером для сглаживания пульсаций ударов.

Из опытных данных очевидна возможность применения электрогидравлического эффекта для наклепа поверхности металлических изделий. При нашем методе выявляется перспектива наклепа поверхности внутренних полостей, что иными способами осуществить пока невозможно.

При достаточной их ширине следы отдельных ударов, сливаясь между собой, при осуществлении подач могут перекрывать друг друга, обеспечивая сохранение поверхности изделия гладкой.

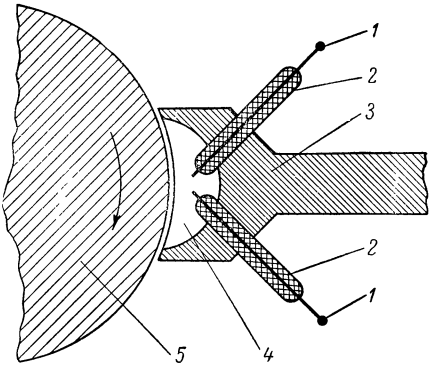
Применение значительных мощностей позволяет говорить о возможности получения значительных глубин наклепанного слоя.

Наклепывать можно как плоские, так и сферические поверхности, используя существующие станки и приспособления, оборудованные ваннами с водой.

Схематический вид устройства для наклепа внешних цилиндрических поверхностей на токарном станке показан на фиг. 36. Наклепывающий инструмент закрепляется в супорте станка, изделие устанавливается в патроне или в центрах.

Схема устройства для наклепа внутренних полостей, например, стенок цилиндра двигателя, изображена на фиг. 37. Для устранения вредных односторонних усилий, действующих на устройство, применены два противоположно расположенных, соединенных последовательно основных искровых промежутка, пробиваемых практически одновременно.

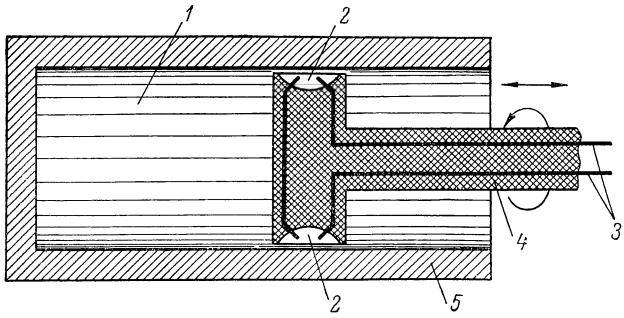
Каждый искровой промежуток расположен внутри сферической кумулятивной выемки, стенка которой находится от зоны разряда на расстоянии, большем радиуса зоны разрушения.



Фиг. 36. Принципиальная схема устройства для наклепа круглых изделий:

1 — электроды; *2* — изоляторы; *3* — державка с фокусирующим устройством; *4* — кумулирующая сфера (полость, заполненная жидкостью); *5* — наклепываемое изделие.

Подобному наклепу, в частности, могут подвергаться оси, валы, цапфы, внутренние и внешние поверхности, обоймы и шарики



Фиг. 37. Принципиальная схема вариантов конструкции для наклепа цилиндрической полости внутри изделия:

1 — полость, заполненная жидкостью; *2* — кумулирующие сферы; *3* — электроды; *4* — тело наклепывающего устройства; *5* — наклепываемое изделие.

подшипников, полости цилиндров двигателей, направляющие станин и другие детали машин, станков и механизмов.

В наших опытах была испытана в модели своеобразная «п и л а» неподвижный инструмент для продольной резки всякого рода нетокопроводящих материалов и горных пород. Выполненная

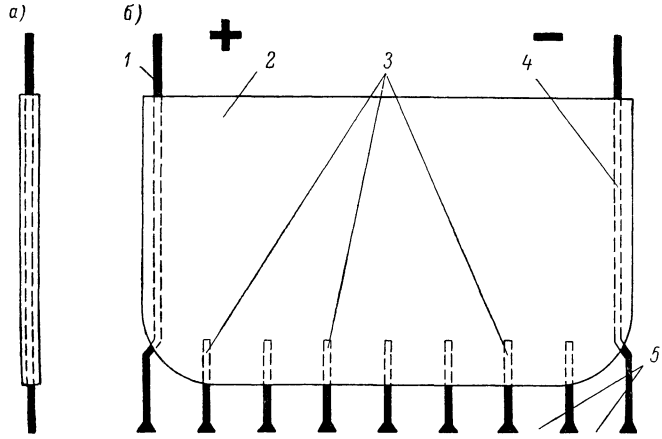
из пластины текстолита, она представляла по существу «дробленый» рабочий искровой промежуток.

Схематический вид ее приведен на фиг. 38.

Основной разряд распадался при этом на ряд отдельных коротких разрядов и, не теряя своего воздействия, осуществлял его более узко и локально в заданном направлении.

Концевые электроды «пилы» подводились к электрической схеме.

Соединяя последовательно ряд таких пил, оказалось возможным не только осуществлять продольную резку на любую



Фиг. 38. Принципиальная схема конструкции для образования продольных разрезов в нетокопроводящих материалах:

а — вид сбоку; *б* — вид спереди.

1 и *4* — электроды; *2* — пластинка из изолятора (текстолит); *3* — заделанные в изолятор промежуточные электроды; *5* — последовательные разрядные промежутки.

заданную длину (при условии питания отдельных пил от схемы), но и вырезать контуры треугольного, квадратного, трапецоидального и других сечений.

Теоретически этим методом можно проходить объемы любой конфигурации и сечения с одновременной разрезкой их внутренней площади на призмы, удобные для удаления и перевозки.

Вода может подаваться различными способами, в том числе сквозь полости крайних электродов или через специальные отверстия в теле пилы.

При образовании в смоченных грунтах полостей-камуфлетов от достаточно мощных разрядов с помощью несложного долотоподобного устройства возможно осуществить забивку свай и шпунта путем придания свае как специального наконечника, так и использования в качестве электродов арматуры в теле сваи. В качестве рабочей среды может быть использована местная почвенная и подпочвенная вода.

Вес сваи и вибрации ее при ударах будут способствовать ее вхождению в грунт.

Опыт на модели подтверждает несложность конструктивного решения этой задачи.

Кроме забивки свай и шпунта, электрогидравлический метод можно использовать для вибрационного уплотнения сырого грунта в глубине или, наоборот, для рыхления его поверхностного смерзшегося слоя (мерзлой корки) с «подрывом» снизу, изнутри, при условии, конечно, достаточной насыщенности грунта водой.

В некоторых случаях электрогидравлические устройства можно применить в качестве легко регулируемых конструктивно простых датчиков импульсов.

В ряде опытов была показана возможность использования эффекта для создания устройств, совершающих круговое или поступательное движение. Осуществить это можно с помощью нескольких конструкций двигателей, использующих как прямое, так и реактивное действие электрогидравлических ударов.

Опыты показали, что древесина, помещенная внутри зоны разряда, разрушается до размочаливания на отдельные волокна, что также представляет известный практический интерес.

Данные опытов дают основания использовать основную электрическую схему в целях установления новой методики определения электрической прочности и электропроводности жидкостей. При весьма кратковременном действии импульсного электрического поля и тока на жидкость изменения в ней, происходящие под влиянием обычного поля и тока и сказывающиеся на показателях электропроводности и электрической прочности, будут отсутствовать.

При осуществлении разрядов внутри объема металлических порошков, стружек или опилок какого-либо металла, помещенных в жидкость, можно наблюдать интенсивное распыление этих металлов в мелкодисперсные взвеси. Это свидетельствует о возможности получения таким способом всякого рода микропорошков и коллоидных растворов различных металлов.

Если крупные (до 3—5 *мм*) металлические опилки, смазанные жиром, пустить плавать на поверхности жидкости, то скользящие разряды, проскакивая между ними, в 3—5 раз удлиняют свой путь и, повидимому, проходят не через эти металлические частицы, но под ними, так как опилки с большой скоростью и силой, подобно взрыву, разлетаются во все стороны вверх с пути каждого скользящего разряда.

Разряд, осуществленный вблизи предмета, смоченного жиром или маслом, отслаивает их от него. Масло удаляется из содержащих его растительных клеток, а жир — из животных клеток; клетки тканей при этом разрушаются, чем достигается более полное извлечение масла.

Этот способ извлечения или удаления маслянистых веществ может представлять практический интерес.

Опытные данные свидетельствуют о возможности применения электрогидравлического эффекта в химии синтеза, в катализе, а также для получения различных полимеров, эмульсий и коллоидов, для ускорения химических реакций, повышения активности катализаторов, для получения многовалентных ионов при кистевых разрядах и т. д.

Многообразие явлений, возникающих в жидкостях при осуществлении в них кистевых, а также поверхностных, скользящих разрядов, позволит при их дальнейшем глубоком исследовании полнее познать природу жидкостей, а особенно структуру и свойства их поверхностного слоя. Об этом свидетельствуют вид и характер разрядов, которые при данной настройке контура во всех случаях зависят только от состава жидкости.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава I. Явления в жидкости вблизи зоны разряда 5

1. Основные схемы . . . . . —
2. Особенности электрогидравлического эффекта 8
3. Проявления электрогидравлического эффекта 9

Глава II. Экспериментальные данные 17

4. Оборудование и приборы для опытов . . . . . —
5. Характер исследованных разрядов и их действие 18
6. Пластиграфический метод изучения электрогидравлического эффекта 26

Глава III. Устройства для использования электрогидравлического эффекта 30

7. Электрогидравлические долота и бурильные устройства . . —
8. Электрогидравлические режущие устройства 37
9. Электрогидравлические форсунки и насос 39
10. Прочие устройства 43

Глава IV. Перспективы использования электрогидравлического эффекта 45

Технический редактор *Р. Г. Польская* Корректор *С. Г. Шистер*

Подписано к печати 21/IV 1955 г. М-36503. Формат бумаги 60×92¹/₁₆ листов 3¹/₂ (2 вклейки). Уч.- изд. листов 3,3. Тираж 6500 экз. Заказ 1155

1-я типография Машгиза. Ленинград, ул. Моисеенко, 10

1 р. 75 к.

МАШГИЗ

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Ленинград, ул. Дзержинского, 10